

Fig. 5.18 Implementació simplificada del Motor elèctric.

5.4.3. Part elèctrica del vehicle

A la Fig. 5.19 es mostra la disposició general de la part elèctrica. Com ja s'ha anat anticipant aquesta està formada pels subsistemes principals següents: Bateria convencional, bateria de supercondensadors, controlador dels supercondensadors, càrregues, element de dissipació, controlador de l'element de dissipació.

En primer lloc tenim la bateria, implementada amb el model "Battery" de la biblioteca SimPower Systems del SIMULINK, i que contempla els efectes esmentats que causen sobre el seu funcionament alguna alteració. D'aquest bloc en traiem tres senyals necessaris per tal de tenir un bon control: U_{BAT} , SOC i I_{BAT} .

Aquesta bateria queda connectada al conjunt dels supercondensadors. Com s'ha dit el model consta d'una font de corrent controlada unida a un condensador ideal.

Per a determinar com treballaran s'ha implementat un petit controlador que decidirà, sempre amb les limitacions constructives necessàries, quin corrent I_{SC} es absorbit o subministrat per aquests.

Això es determina a partir del corrent I_{PE} que ha d'absorbir o subministrar la part elèctrica segons les demandes energètiques del vehicle. Aquest corrent I_{PE} està limitat a 90A segons el dimensionat del motor elèctric.



El bloc de control analitza a cada instant la potència sol·licitada a la part elèctrica P_E [W]. Per a aquesta té definits uns rangs de funcionament de manera que per a cada interval (Taula 5.6) queda definit un valor constant K_{SC} que equival al percentatge d'aquesta potència que es vol que assumeixin els supercondensadors.

RANG DE P_E [kW]	K_{SC}
De -30 a -2	1
De -2 a 2	0
De 2 a 10	0,75
De 10 a 30	0,93

Taula. 5.6 Rangs de treball del controlador de la bateria de Supercondensadors.

Així, en base al corrent total I_{PE} es determina el corrent I_{SC} com (Eq. 5.22):

$$I_{SC} = K_{SC} \cdot I_{PE} \quad (\text{Eq. 5.22})$$

El valor de potència de referència a partir del qual comencen a actuar els supercondensadors queda definit de la següent manera.

Les característiques de la bateria han quedat descrites a la Taula 5.3. Si volem que el corrent que entri o surti d'aquesta no passi dels 6,5A i sabent que treballarà entre U_{BAT} i $1,17 \cdot U_{BAT}$, podem definir la P_{BATMAX} (Eq. 5.23).

$$P_{BATMAX} = U_{BAT} \cdot I_{BATMAX} \approx 2000W \quad (\text{Eq. 5.23})$$

A plena càrrega el corrent que circula per la part elèctrica serà $I_{PEMAX}=90A$. Comparant aquest valor amb els 6,5A que volem que circulïn teòricament per la bateria tenim que els supercondensadors hauran d'absorbir aproximadament un 93% del corrent total.

A la Fig. 5.19 es veuen també les càrregues modelitzades com una resistència que dissipa els 5kW de potència.

Finalment tenim l'element de dissipació i el seu "controlador". Aquest element serveix per a estabilitzar el comportament de la part elèctrica.

Consisteix en una font de corrent controlada i connectada a terra. S'encarrega de fer que la tensió de la bateria no superi els seus límits constructius. D'aquesta manera, quan la tensió d'aquesta supera el 117% de la seva tensió nominal es genera una consigna cap a la font de corrent.





6. SIMULACIONS DE REFERÈNCIA

Un cop implementat el sistema complet per a l'arquitectura híbrida seleccionada es realitzaran una sèrie de simulacions per a diferents variants de vehicle. L'objectiu és el de determinar una sèrie de valors de referència per a analitzar l'estratègia de control.

En primer lloc, s'analitzarà una arquitectura de vehicle convencional. A continuació s'analitzaran dues variants de vehicle híbrid. La diferència entre elles serà el fet d'incorporar o no la bateria controlada de supercondensadors. Aquestes dues simulacions serviran també com a referència donat que no incorporaran cap estratègia de control complicada. Per contra es disposarà d'un repartiment al 50%. Això significa que cada motor aportarà el 50% del parell necessari per a moure el vehicle.

Al mateix temps seran útils també per tal de veure el comportament dels diferents elements del sistema i poder així valorar la utilitat de la bateria de supercondensadors.

6.1. Vehicle convencional

6.1.1. Plantejament

En primer lloc analitzarem una arquitectura de vehicle convencional. El sistema o entorn de simulació serà el mateix que s'ha plantejat anteriorment, simplement es descartaran o desactivaran els elements no necessaris.

6.1.2. Gràfics de funcionament

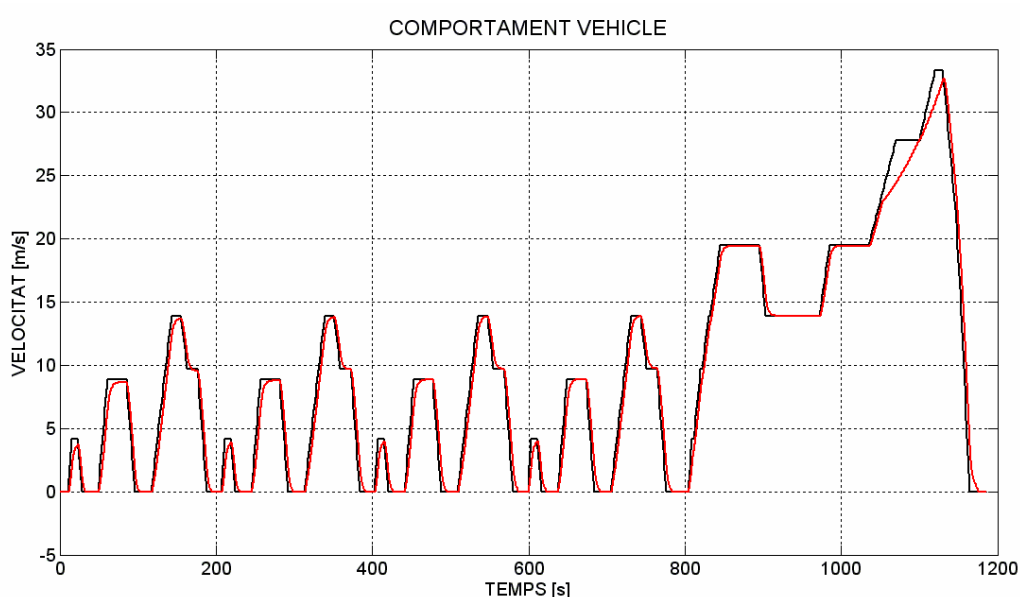


Fig. 6.1 Resposta del vehicle. Negre: perfil de velocitats consagat; Vermell: velocitat real.



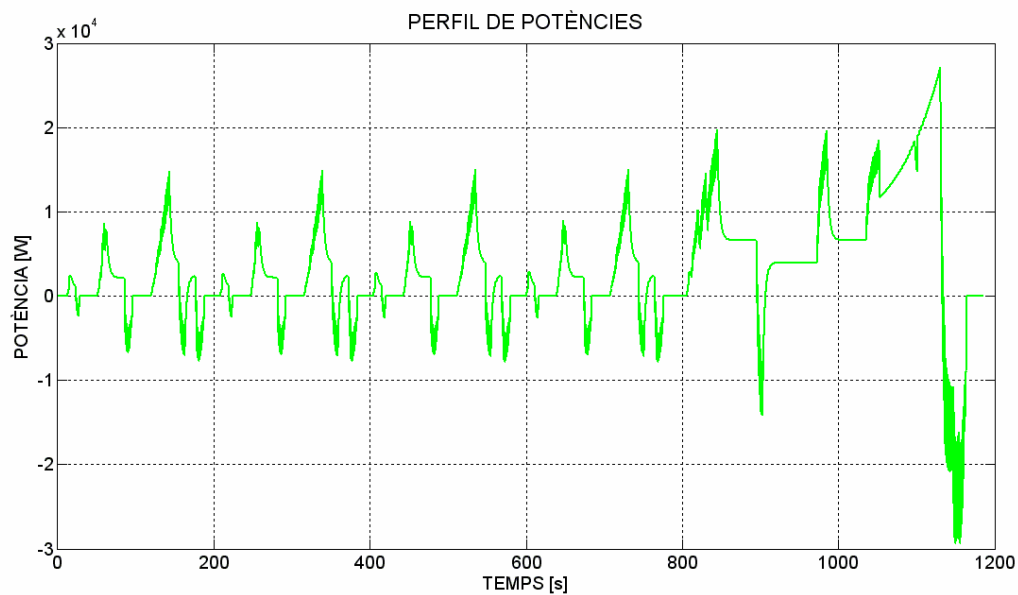


Fig. 6.2 Perfil de potències. ($P>0$: de tracció; $P<0$: de frenada).

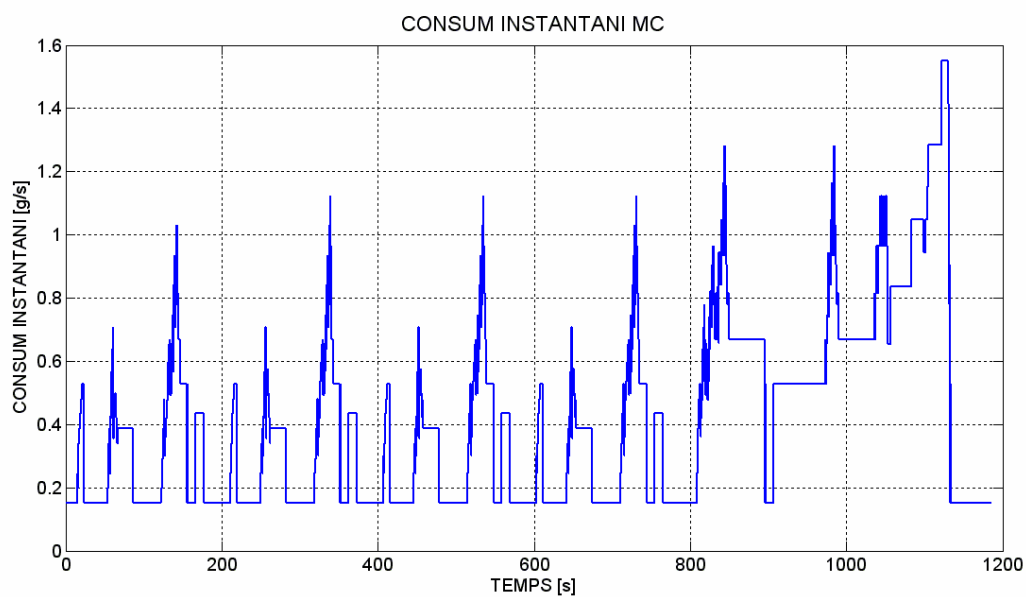


Fig. 6.3 Consum instantani en [g/s] del Motor de combustió.

6.1.3. Resultats

VEHICLE	
Consum energètic global [kJ]	20.444,69
MC / Part mecànica	
Rendiment mig MC [%]	22,00
Consum combustible [g]	488,64
Consum mig [l/100km]	6,67

Taula. 6.1 Resum dels resultats numèrics de la simulació.



6.1.4. Anàlisi

Notem en primer lloc, observant la Fig. 6.1, que el vehicle amb el dimensionat actual no es capaç de seguir el perfil de velocitats en la última part del cicle. Això succeeix a causa de que el motor no pot donar tot sol, al règim de gir marcat, el parell necessari per a seguir el perfil.

Aquesta falta de parell en el tram final es deu a la marxa que engrana la caixa de canvis automàtica. Passa de quarta a cinquena i el parell que pot donar el motor disminueix.

Aquest resultat és important ja que tenim com a resultat un vehicle incapaç de seguir el cicle (recordem que el perfil NEDC no és ni molt menys exigent). A més presenta un consum de combustible mig de aproximadament 6,7l/100km (Taula 6.1) més típic de vehicles amb prestacions superiors.

Cal dir que aquesta situació es deu bàsicament al motor en concret que s'ha seleccionat. Per tant no s'ha de caure en l'error de magnificar-ho, ja que en l'actualitat hi ha nombrosos motors capaços de donar prestacions elevades amb consums continguts.

A la Fig. 6.2 es mostra el perfil de potència [W] fruit del moviment del vehicle. Els valors positius corresponen a la tracció i els negatius a les frenades. A la Fig. 6.3 tenim el consum de combustible instantani [g/s] amb el que ha treballat el motor.

Veiem a la Taula 6.3 el valor de consum energètic. Aquest valor indica l'energia global consumida pel sistema. En aquesta configuració aquest consum equival només a l'energia del combustible, a la resta també inclou el consum de la bateria (Eq. 6.1).

$$C_{ENERGÈTIC} = C_{COMB. MC} + C_{BATERIA} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

On $C_{COMB. MC}$ és el consum de combustible del motor de combustió en [J] i $C_{BATERIA}$ és la disminució de l'energia emmagatzemada a la bateria també en [J].

Això ens permetrà establir en les properes simulacions el concepte d'estalvi energètic (Eq. 6.2). Aquest queda definit com el percentatge de reducció de consum energètic de la simulació d'estudi $C_{ENERGÈTIC i}$ [J] respecte al consum d'aquesta primera simulació de referència $C_{ENERGÈTIC CONVENCIONAL}$ [J].

$$E_{ENERGÈTIC} = \frac{C_{ENERGÈTIC V. CONVENCIONAL} - C_{ENERGÈTIC i}}{C_{ENERGÈTIC V. CONVENCIONAL}} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 6.2})$$



6.2. Configuració híbrida al 50%

6.2.1. Plantejament

En aquest cas disposarem ja d'una arquitectura híbrida paral·lel. Tan el motor elèctric com el de combustió aportaran parell a la transmissió. El primer també recuperarà part de l'energia de la frenada.

Aquesta segona simulació de referència pretén, entre altres coses, veure com treballa la bateria principal sota les condicions plantejades sense l'ajuda dels supercondensadors.

Com s'indica, el repartiment serà del 50%. Això vol dir que la consigna del pedal de l'accelerador, transformada en senyal de força, es derivarà cap a cadascuna de les parts (elèctrica/mecànica) multiplicada per una constant $K_{\text{REPARTIMENT}}=0,5$.

Aquest repartiment inicial, sense recórrer a cap gestió energètica més complicada, servirà alhora per poder extreure'n una sèrie de conclusions útils per tal de plantejar l'estratègia de control.

6.2.2. Gràfics de funcionament

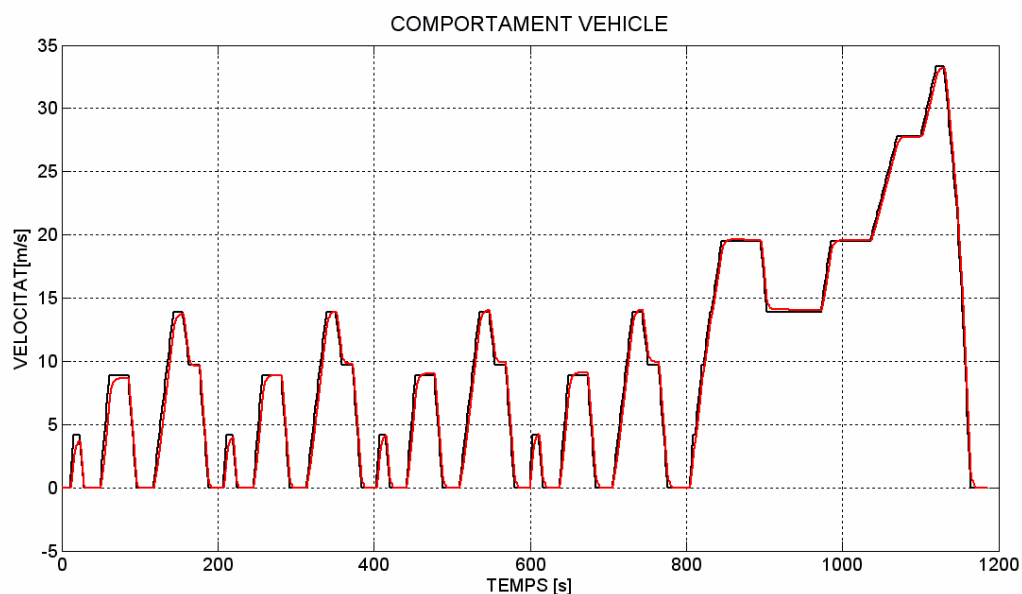


Fig. 6.4 Resposta del vehicle. Negre: perfil de velocitats consignat; Vermell: velocitat real.



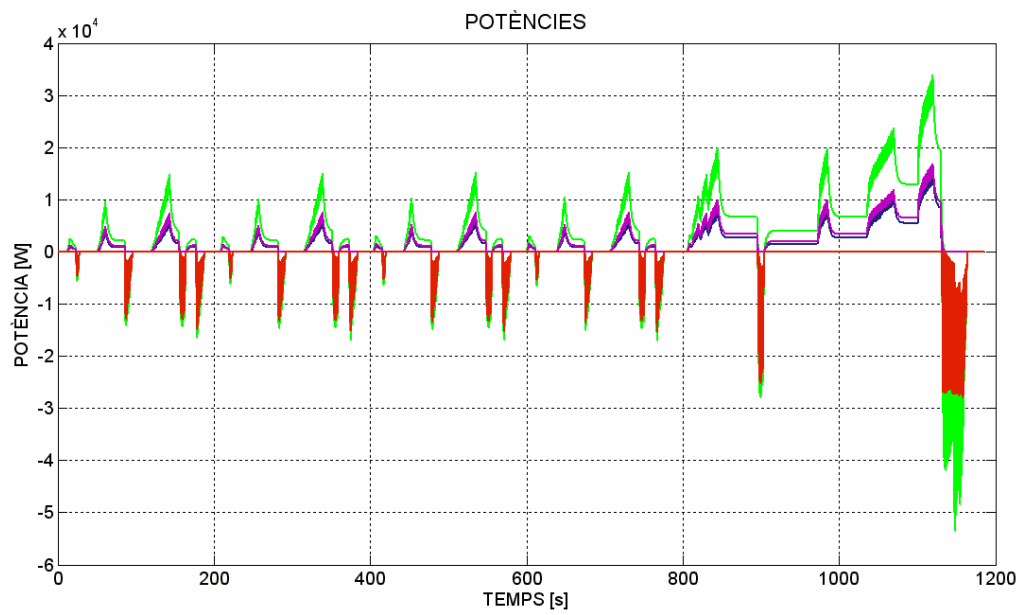


Fig. 6.5 Comparativa dels perfils de potències. ($P > 0$: de tracció; $P < 0$: de frenada).

■ Transmissió; ■ Motor de combustió;
■ Motor elèctric (tracció); ■ Motor elèctric (frenada).

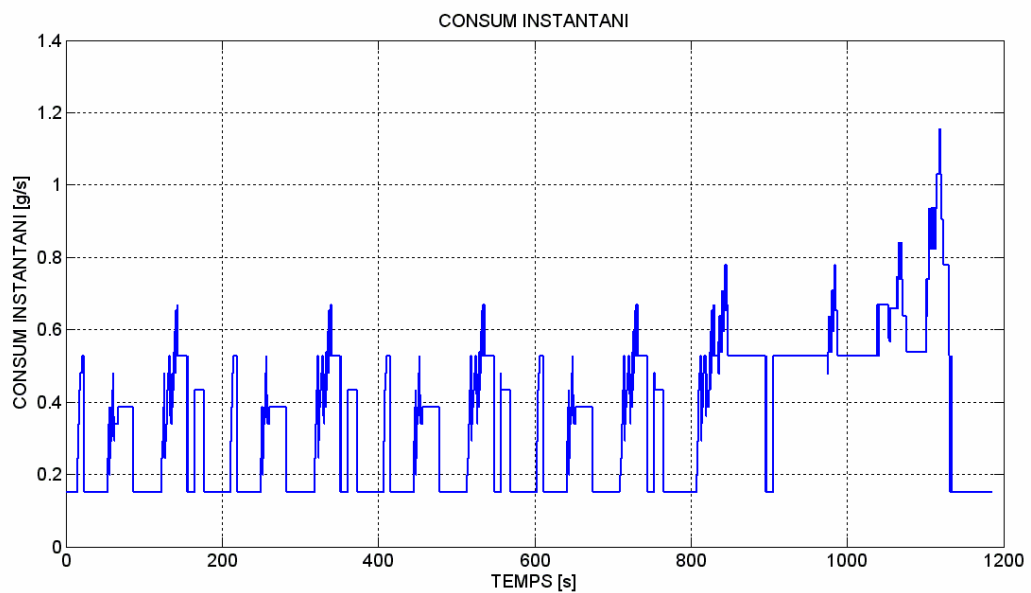


Fig. 6.6 Consum instantani en [g/s] del Motor de combustió.



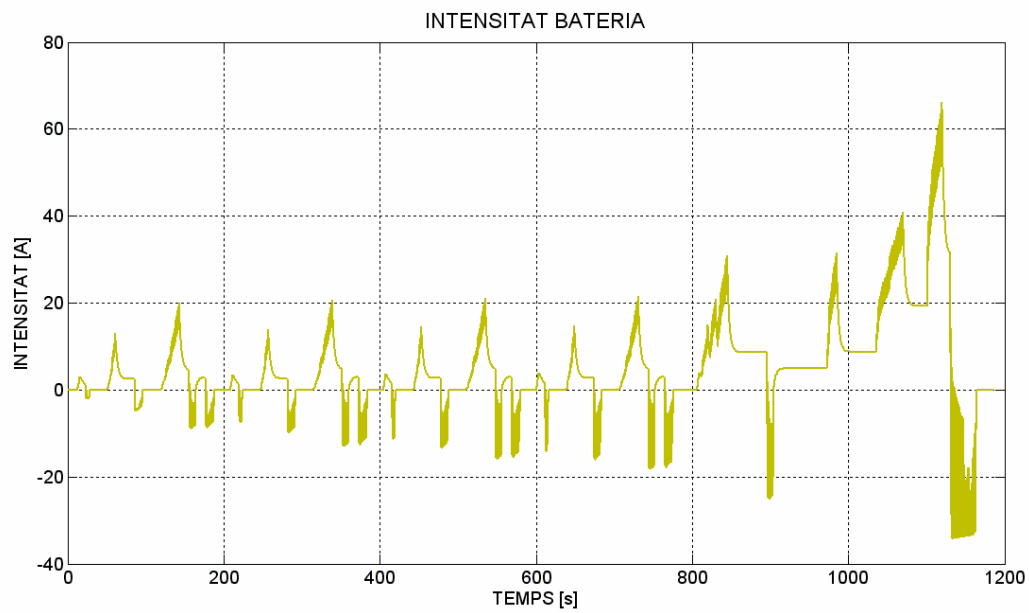


Fig. 6.7 Intensitat de treball de la bateria principal. ($I > 0$: subministrada; $I < 0$: absorbida).

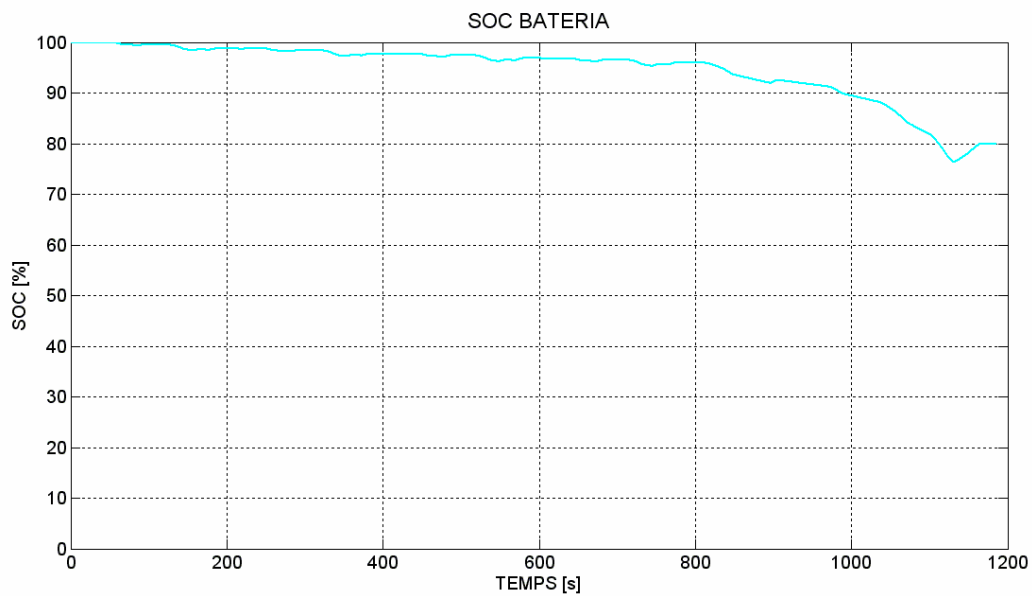


Fig. 6.8 Evolució de l'estat de càrrega de la bateria.



6.2.3. Resultats

VEHICLE	
Consum energètic global [kJ]	18.905,84
MC / Part mecànica	
Rendiment mig MC [%]	14,00
Consum combustible [g]	413,84
Consum mig [l/100km]	5,64
ME / Part elèctrica	
Energia fre recuperada [%]	82,54
SOC _{FINAL BATERIA} [%]	80,00

Taula 6.2 Resum dels resultats numèrics de la simulació.

6.2.4. Anàlisi

En primer lloc es comentaran els gràfics de funcionament obtinguts. Cal notar doncs que en aquesta ocasió el vehicle si ha estat capaç de seguir el perfil de velocitats indicat (Fig. 6.4) sense cap tipus de problema.

Pel que fa a la part mecànica tenim que tots dos motors han treballat correctament hi han pogut aportar a la transmissió el parell total necessari.

A la Fig. 6.5 veiem els diferents perfils de potències generats. Notem com la potència total generada (de propulsió) en cada instant de temps es reparteix de manera uniforme entre tots dos motors. La petita diferència que es pot observar entre la potència subministrada pel MC i la del ME es deu a que tot i rebre els dos la mateixa consigna de parell, tenen mapejats diferents punts de funcionament. El total però, gràcies a la realimentació plantejada en la implementació del sistema, és sempre el demandat.

Per a les potències negatives veiem també (Fig. 6.5) la part corresponent a la frenada regenerativa. Del total de potència generada a la frenada es mostra la que es assumida pel motor elèctric i enviada cap a la part elèctrica.

Per últim, en la part mecànica, veiem com els valors de consum instantani que presenta el motor s'han reduït (Fig. 6.6).

Pel que fa a la part elèctrica els resultats ens serveixen bàsicament per veure com de malament treballa la bateria. Cal recordar que es tracta d'una bateria de $U_{NOMINAL}=288V$ i Capacitat de 6,5Ah. Per contra veiem (Fig. 6.7) com contínuament s'està superant els 6,5A arribant a valors fins a deu vegades superiors a aquest.



Això es tradueix en un deteriorament de la bateria. La continua repetició d'aquests cicles redueix la vida d'aquesta de forma accelerada. Veiem que el SOC (Fig. 6.8) va fluctuant al llarg de l'experiència.

Pel que fa als resultats numèrics de la simulació es important notar que, amés de tenir un vehicle que si ha pogut seguir el perfil de conducció, hi ha hagut una reducció en el consum energètic global i en el consum de combustible (Taula 6.2).

Per a aquesta disposició el consum energètic global queda definit com l'energia del combustible més el consum energètic de la bateria (Eq. 6.1).

Aquest consum de bateria equival a la diferència entre l'energia emmagatzemada a l'inici de la simulació i la romanent al final d'aquesta.

En l'últim apartat del capítol s'analitzaran més en detall i quantitativament les diferències entre les 3 simulacions.

6.3. Configuració híbrida al 50% amb Supercondensadors

6.3.1. Plantejament

En aquest cas el plantejament és el mateix però, ara sí, incorporarem la bateria de supercondensadors amb el seu controlador.

Aquesta simulació ha de servir, apart d'analitzar com treballen els diferents elements del sistema, per validar la implantació d'aquests supercondensadors.

Per tal de gestionar correctament el sistema introduïrem en aquest punt una primera part de l'estratègia de control.

Quan s'arrenca el vehicle aquest, amb la bateria principal completament carregada, realitza una pre-càrrega dels supercondensadors. L'objectiu bàsic d'aquesta acció és el d'assegurar l'aportació d'aquests en les primeres acceleracions.

De no ser així en els primers instants de circulació la part elèctrica hauria d'extreure l'energia a aportar de la bateria. Això significaria que aquesta patiria els pics de corrent que hem vist anteriorment i que reduirien notablement la seva vida.

Així doncs es fa aquesta pre-càrrega de 4000C en els supercondensadors que equival a un traspàs energètic de 400 kJ. Per contra, la bateria iniciarà el cicle amb un SOC_{INICIAL} del 94,9%.



6.3.2. Gràfics de funcionament

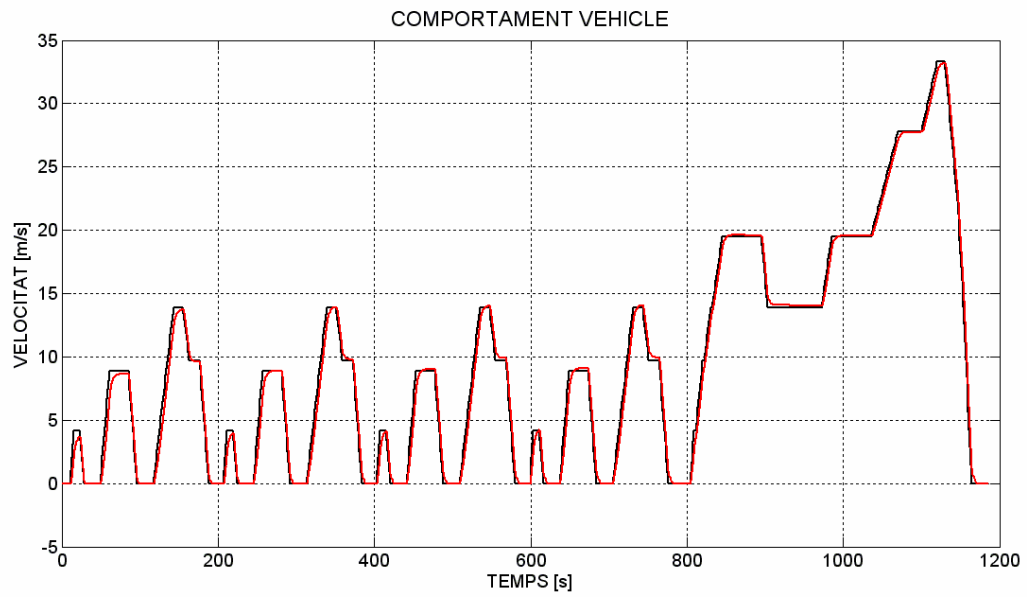


Fig. 6.9 Resposta del vehicle. Negre: perfil de velocitats consignat; Vermell: velocitat real.

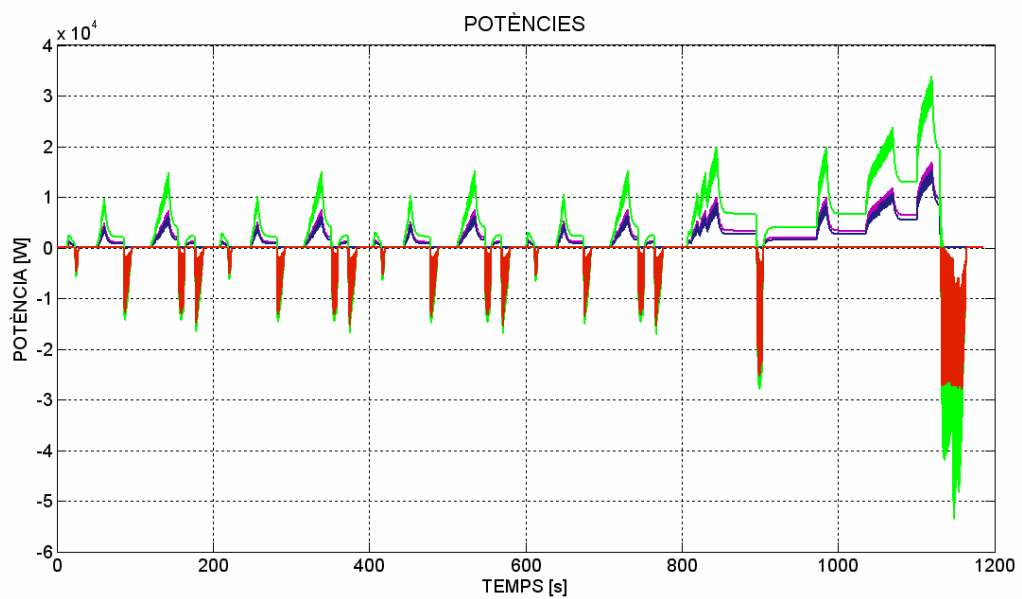


Fig. 6.10 Comparativa dels perfils de potències. ($P > 0$: de tracció; $P < 0$: de frenada).

■ Transmissió; ■ Motor de combustió;
■ Motor elèctric (tracció); ■ Motor elèctric (frenada)



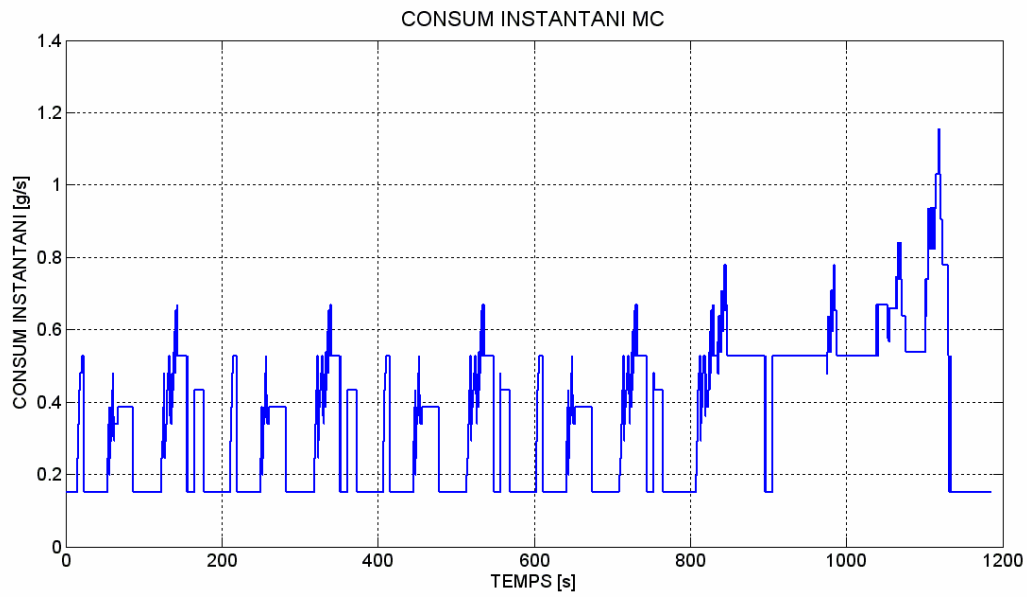


Fig. 6.11 Consum instantani en [g/s] del Motor de combustió.

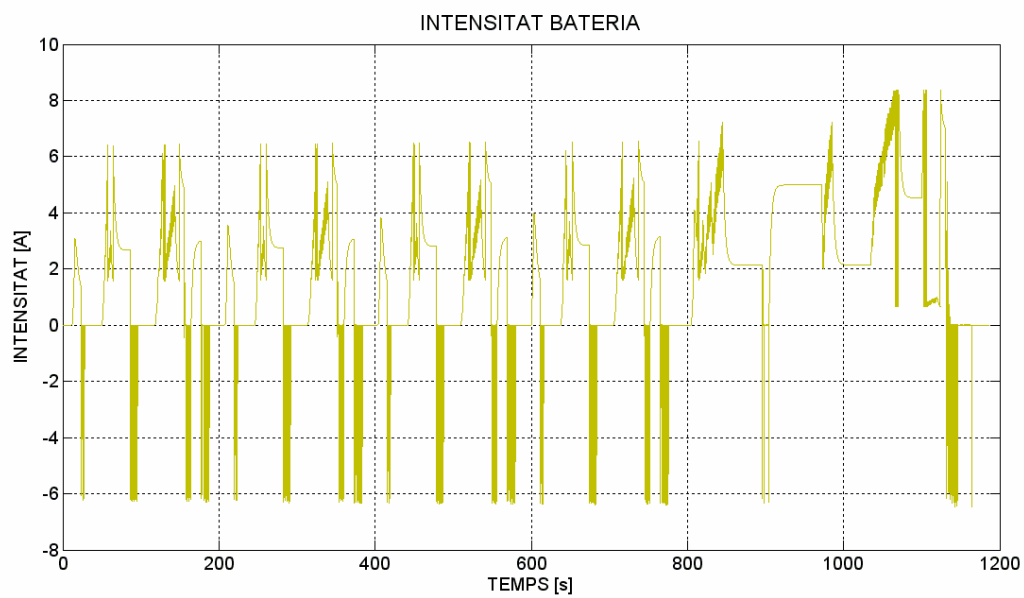


Fig. 6.12 Intensitat de treball de la bateria principal. ($I > 0$: subministrada; $I < 0$: absorbida).



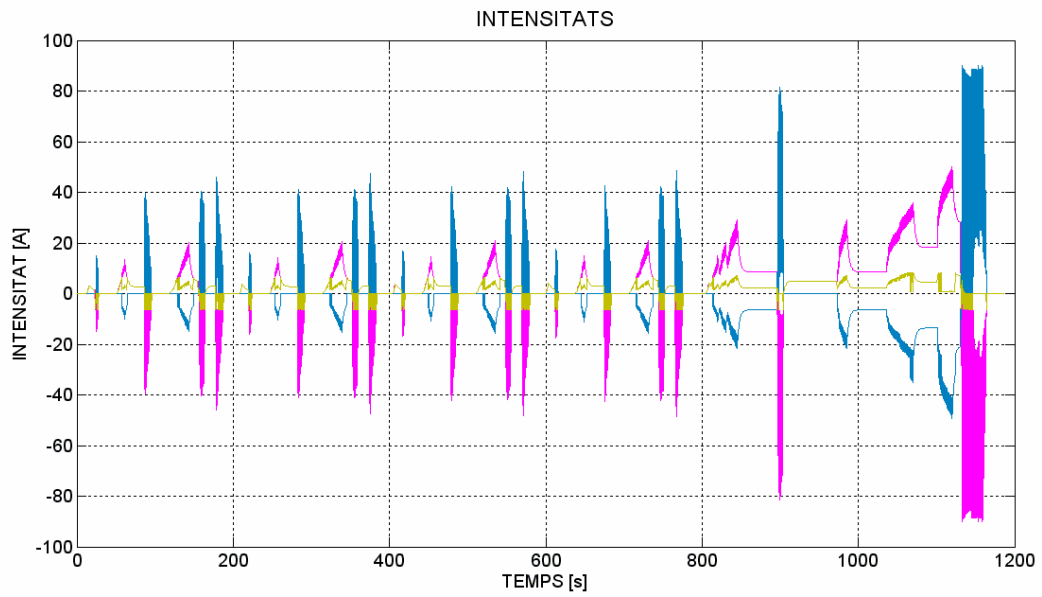


Fig. 6.13 Comparativa dels perfils de intensitats. ($I > 0$: subministrada; $I < 0$: absorbida).

■ Global part elèctrica; ■ Bateria;

■ Supercondensadors ($I > 0$: absorbida; $I < 0$: subministrada);

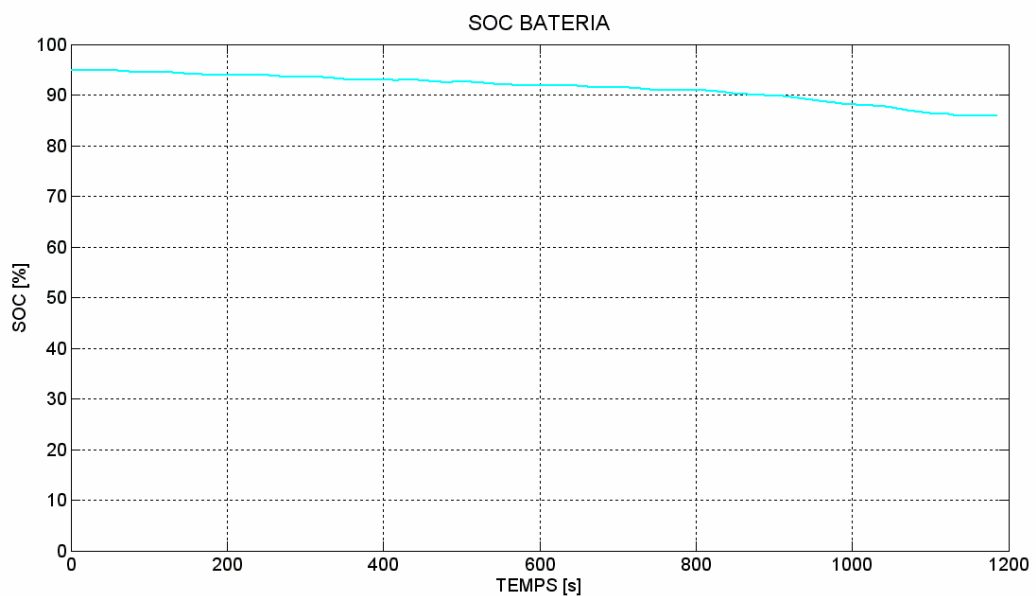


Fig. 6.14 Evolució de l'estat de càrrega de la bateria.



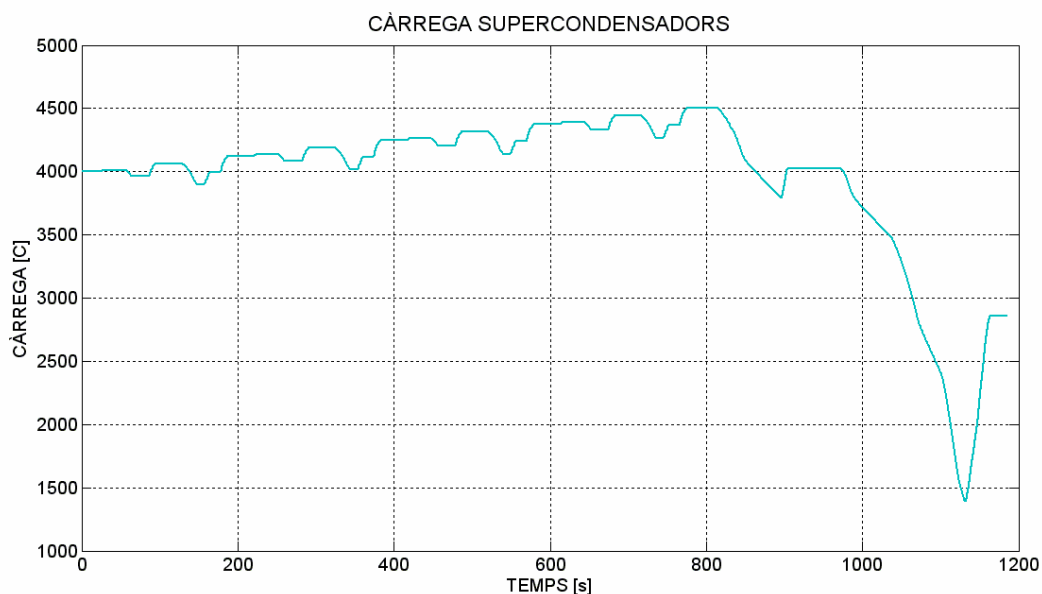


Fig. 6.15 Evolució de la càrrega dels supercondensadors.

6.3.3. Resultats

VEHICLE	
Consum energètic global [kJ]	18.216,59
MC / Part mecànica	
Rendiment mig MC [%]	14,00
Consum combustible [g]	413,84
Consum mig [l/100km]	5,64
ME / Part elèctrica	
Energia fre recuperada [%]	82,54
SOC _{FINAL BATERIA 1} [%]	85,97
Càrrega SC final [C]	2858,90
SOC _{FINAL BATERIA} [%]	89,00

Taula 6.3 Resum dels resultats numèrics de la simulació.

6.3.4. Anàlisi

En aquest cas el comportament del vehicle (Fig.6.9) ha estat el mateix que en la simulació anterior. De fet tenim que el comportament de la part mecànica ha estat exactament igual (Fig. 6.10 i Fig. 6.11). La diferència la tenim en com ha estat treballant la part elèctrica durant l'experiència.

Veiem que la diferència més significativa la tenim en el rang de corrents que ha patit la bateria (Fig. 6.12). Tant subministrant energia com recuperant-la aquests s'han mantingut



dins d'un interval molt més estret que en la anterior simulació. Tenint així que en molt poques ocasions, i només de manera puntual, s'ha superat el valor de 6,5A.

Com dèiem això es deu a l'aportació dels supercondensadors que actuen tant per a corrents positius com negatius segons s'ha descrit en apartats anteriors. Això es pot apreciar en el gràfic comparatiu (Fig. 6.13) on tenim que aquests assumeixen la major part de les sol·licituds. Permeten doncs que la bateria treballi correctament.

S'observa això també en el gràfic del SOC (Fig. 6.14). Aquest pateix un descens molt més suau. En el gràfic veiem que no té un valor inicial del 100%, ja que s'ha realitzat la pre-càrrega comentada dels supercondensadors.

Pel que fa als resultats (Taula 6.3) notem com hi ha hagut una reducció del consum energètic gràcies a una millor recuperació d'energia sobretot en les frenades més fortes. Els supercondensadors eviten que l'element dissipador de seguretat que incorpora la part elèctrica actuï tant sovint com en l'anterior simulació (Fig. 6.15). Això suposa tenir un valor de SOC final de la bateria més elevat. Per a aquest cas el concepte de consum energètic es defineix igual que en l'anterior simulació.

6.4. Resum i comparació de resultats

6.4.1. Comportament general del vehicle

	SEGUIMENT PERFIL	ESTALVI ENERGÈTIC	REDUCCIÓ CONSUM
CONVENCIONAL	x	---	---
HÍBRID 50%	✓	7,53 %	15,31 %
HÍBRID 50% + SC	✓	10,90 %	15,31 %

Taula 6.4 Resum comparatiu del comportament del vehicle.

D'aquestes primeres simulacions es poden extreure dues conclusions prou clares. La primera és l'avantatge important de la implantació d'un configuració híbrida. Tant a nivell funcional com pel que fa a la reducció en el consum de combustible i a la generació dels gasos contaminants que la combustió d'aquests produeixen.

Veiem com per a totes dues configuracions híbrides hi ha hagut una reducció en el consum de combustible d'un 15% (Taula 6.4). Això ve juntament amb l'estalvi energètic, del 7,5% per al primer cas i del 10,9% en el segon, provinent d'utilitzar una font d'energia amb millors rendiments de treball. Cal analitzar però una mica més que és el que ha succeït.



Per a les dues configuracions híbrides analitzades el repartiment ha estat constant i del 50%. Això significa que per a cada instant de temps la consigna de parell enviada al motor de combustió ha estat la meitat de la que se li consignava en la primera simulació de referència.

Notem però que la reducció en el consum de combustible i també en el consum energètic no és ni molt menys del 50% (Taula 6.4). Això es deu bàsicament a que el motor de combustió tot i tenir menys sol·licituds ha treballat en punts operatius amb menor eficiència. A la Taula 5.5 es mostra el rendiment mig amb el que ha treballat al llarg de cada simulació. Aquest aspecte caldrà tenir-lo en compte de cara a la definició de l'estratègia de control.

	RENDIMENT GLOBAL MC
CONVENCIONAL	22,11 %
HÍBRID 50%	14,11 %
HÍBRID 50% + SC	14,11 %

Taula 6.5 Resum comparatiu del rendiment mig del Motor de combustió.

6.4.2. Comportament de la part elèctrica

Una segona conclusió és la gran millora que suposa introduir la bateria de supercondensadors en la part elèctrica del vehicle. Aquesta no només millora les condicions de treball de la bateria (Fig. 6.12), allargant-ne notablement la vida i les prestacions, sinó que a més millora l'eficiència del nostre vehicle (Taula 6.6).

	SOC _{INICIAL BATERIA}	SOC _{FINAL BATERIA 1}	SOC _{FINAL BATERIA}	I _{MAX BATERIA}
CONVENCIONAL	---	---	---	---
HÍBRID 50%	100,00 %	---	80,00 %	66,20 A
HÍBRID 50% + SC	94,93 %	85,97 %	89,00 %	8,40 A

Taula 6.6 Resum comparatiu de l'estat final de la Part elèctrica.

Veiem com en la configuració amb els supercondensadors incorporats el descens en el SOC de la bateria al llarg del cicle de conducció és molt inferior. Passa del 94,93% al 85,97%. Aquest últim valor és el que té la bateria un cop acabat el cicle, i ja de per sí és superior al SOC final que aconsegueix aquesta en la primera configuració híbrida. Amés però resta per fer el traspàs energètic de la càrrega romanent en els supercondensadors. Amb això s'assoleix un valor final del 89%.

Tot això sumat a les millors condicions de treball de la bateria ja comentades justifiquen la implantació d'aquest element. Com s'ha dit de moment no entrarem encara en valoracions econòmiques.



7. ESTRATÈGIA DE CONTROL

En aquest apartat es definiran els criteris usats per a determinar l'estratègia. Aquests són diversos i alguns s'han establert després d'analitzar el comportament del vehicle i dels seus elements en les simulacions mostrades anteriorment.

Així per a la gestió es proposa definir 4 modes de funcionament que s'activaran i desactivaran en funció de l'estat del vehicle. Aquests modes engloben les diferents maneres en les que pot treballar: Amb una propulsió purament elèctrica (mode-1); Amb una propulsió combinada o híbrida (mode-2); Amb una propulsió convencional (mode-3); o en mode recàrrega (mode-4).

7.1. Definició de l'estratègia

7.1.1. Pre-càrrega dels supercondensadors

Quan s'arrenca el cotxe, abans de posar-se en marxa i amb la bateria principal completament carregada realitza una pre-càrrega de 4000C en els supercondensadors que equival a un traspàs energètic de 400 kJ. Per contra, la bateria iniciarà el cicle amb un **SOC_{INICIAL}=94,9%**. L'objectiu és assegurar l'aportació dels supercondensadors en les primeres acceleracions.

Es pot veure l'algorisme de control aplicat per a aquest primer procés de l'estratègia a la Fig. 7.1.

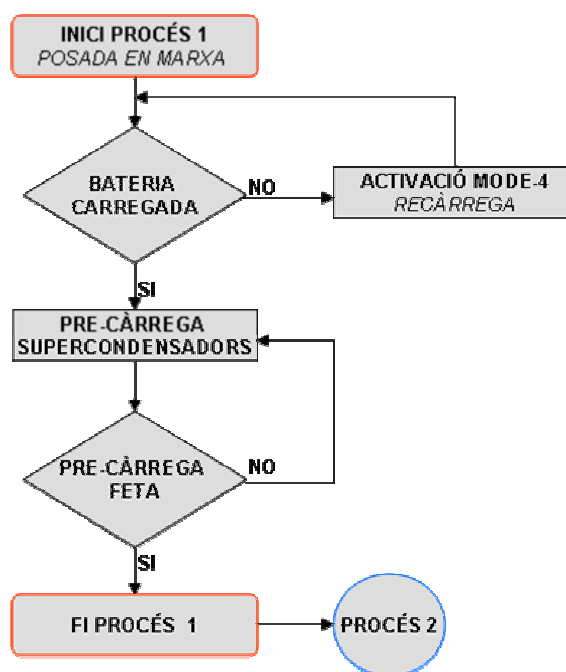


Fig. 7.1 Algorisme de control 1: Posada en marxa del vehicle.



7.1.2. Modes de funcionament

- Mode 1: Propulsió elèctrica

S'ha vist com en les configuracions híbrides provades els punts operatius als que treballava el motor de combustió tenien rendiments molt baixos. Observant el mapejat d'eficiències del motor, sabem que a baixos règims i amb baixes sol·licitacions de parell la seva eficiència cau considerablement. És per això que es determina un primer mode de funcionament on es prescindirà del motor de combustió que quedarà aturat. Aquest primer mode usarà com a únic mecanisme de propulsió el motor elèctric.

Es defineix doncs un valor de potència de referència $P_{REF\ MODE\ 1} \leq P_{MAX\ ME}$ per sota del qual s'activarà el mode 1.

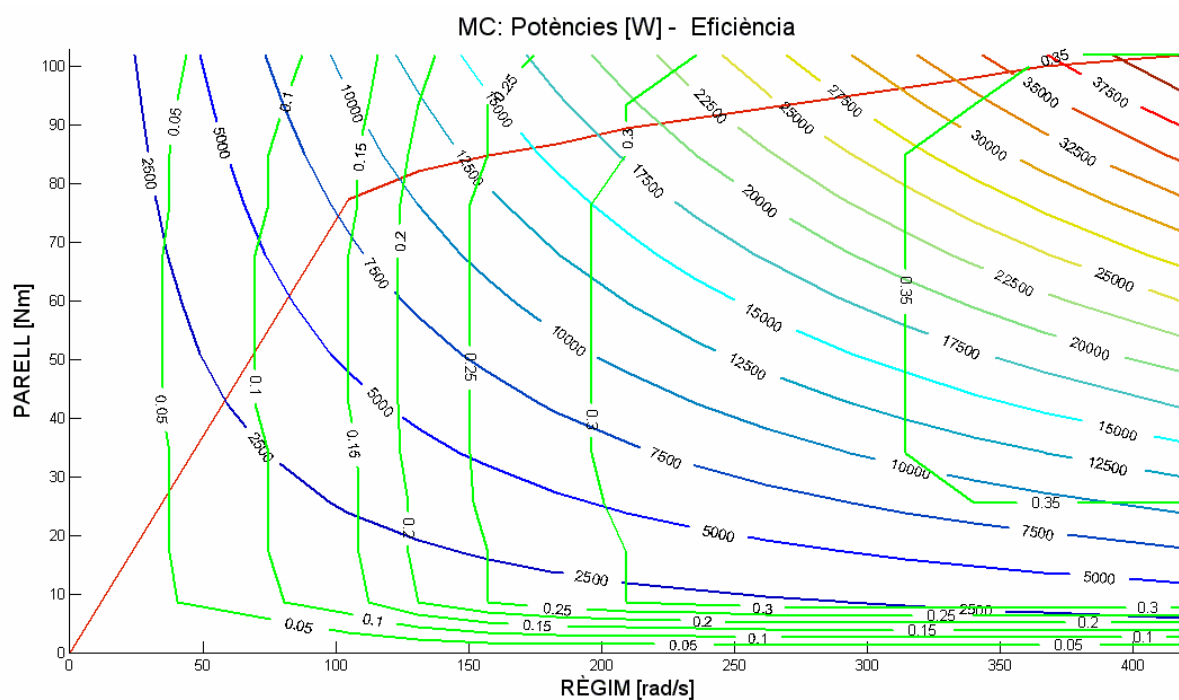


Fig. 7.2 Mapejat de potències i eficiències del Motor de combustió.

■ Corba de parell màxim; ■ Corbes iso-eficiència; ■ Corbes iso-potència;

En el gràfic anterior (Fig. 7.2) es mostra el mapejat d'eficiències del MC superposat amb el mapejat de potències. Trobem també la seva corba de parell màxim. D'aquí triem el valor de potència per passar del mode 1 al modes 2.

Sempre que la demanda de potència estigui per sota de $P_{REFMODE1}=7.000W$ només funcionarà el motor elèctric. Veiem al gràfic com aquest valor de potència exclou la majoria de punts de funcionament de poca eficiència per sota de la corba de parell màxim.



- Mode 2: Propulsió combinada

Per sobre de la $P_{REFMODE1}$, si la part elèctrica està es disposició de donar parell, s'activa el mode 2. En aquest funcionaran els dos motors. Per al cas del motor de combustió es busca que treballi en els punts operatius de major eficiència.

Per una banda hi ha el règim de gir de la transmissió que ve determinat a partir de la velocitat lineal del vehicle i a través de la caixa de canvis i del grup final. Per a cada règim doncs tenim quin és el parell motor per al qual l'eficiència d'aquest és major (marcat en blau a la Taula 7.1). A partir d'aquí, per a cada instant de temps es consigna al motor el parell òptim. I la consigna que rebrà el motor elèctric serà la diferència entre el que requereix el vehicle per a seguir el perfil i el que s'ha consignat al motor de combustió.

	104.7	130.9	157.1	183	209	236	262	288	314	340	367	419	ω [rad/s]
8.54	0.13	0.2	0.25	0.28	0.3	0.31	0.33	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	
16.95	0.14	0.21	0.25	0.28	0.3	0.32	0.33	0.34	0.35	0.35	0.35	0.35	
25.49	0.14	0.21	0.26	0.28	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.35	0.35	0.35	
34.04	0.14	0.22	0.26	0.29	0.31	0.32	0.34	0.34	0.35	0.36	0.36	0.36	
42.44	0.15	0.22	0.26	0.29	0.31	0.33	0.34	0.35	0.35	0.36	0.36	0.36	
50.99	0.15	0.22	0.26	0.29	0.31	0.33	0.34	0.35	0.35	0.36	0.36	0.36	
59.53	0.15	0.22	0.26	0.29	0.31	0.33	0.34	0.35	0.35	0.36	0.36	0.36	
67.94	0.15	0.22	0.26	0.29	0.31	0.33	0.34	0.35	0.35	0.36	0.36	0.36	
76.48	0.14	0.22	0.26	0.29	0.31	0.32	0.34	0.34	0.35	0.36	0.36	0.36	
85.02	0.14	0.21	0.25	0.28	0.3	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.36	0.36	
93.43	0.13	0.2	0.25	0.28	0.3	0.31	0.33	0.34	0.34	0.35	0.36	0.36	
101.97	0.12	0.19	0.23	0.26	0.28	0.3	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.35	
τ [Nm]													

Taula 7.1 Mapejat d'eficiències del Motor de combustió.

- Mode 3: Propulsió convencional

Si la part elèctrica no està es disposició de donar parell, s'activa el mode 3. En aquest cas el motor de combustió funcionarà tot sol com en l'arquitectura convencional. Els criteris que determinen l'estat de la part elèctrica es descriuen a continuació

- Mode 4: Recàrrega bateria

Atenent a les prestacions que es vol que tingui el vehicle s'evitarà que aquest hagi de treballar alhora donant parell a la transmissió i recarregant la part elèctrica.

Els dos criteris que defineixen l'estat de la part elèctrica són la càrrega dels supercondensadors i el SOC de la bateria. Per al primer paràmetre el valor aplicat és **$Q_{SC}=500C$** . Amb això es pretén que aquests no es quedin completament descarregats durant un cicle de conducció. Quan s'arriba a aquest valor de càrrega s'activa el mode 3 si el



vehicle està en moviment, i el mode 4 si està aturat. Per al segon paràmetre apliquem un valor mínim de $SOC_{BATERIA}=80\%$. És un valor força elevat però es vol que aquesta estigui bastant carregada i evitar quan s'arrenca el vehicle (Procés 1), que el motor de combustió hagi de treballar massa per a recarregar-la.

Per a aquest mode es consignarà un senyal F_{MC} al motor de combustió. A l'apartat 5.4.3 s'ha determinat el valor de potència $P_{BATMAX}=2000W$ a partir del qual començaven a actuar els supercondensadors (Eq. 5.23). Analitzant el gràfic anterior (Fig. 7.2) per sota de la corba $P=2000W$ queden delimitats una sèrie de punts operatius (ω_{MC} [rad/s], T_{MC} [Nm]). Mitjançant el mètode d'assaig i error s'ha triat el punt més adequat per al motor de combustió. El valor de parell obtingut, convertit en un senyal de força, és la consigna que s'aplica durant el mode 4. Aquesta consigna és doncs $F_{MC}=66N$.

En resum, quan el vehicle està realitzant un determinat cicle de conducció la gestió es basa en l'algorisme de control que es mostra a continuació (Fig. 7.3).

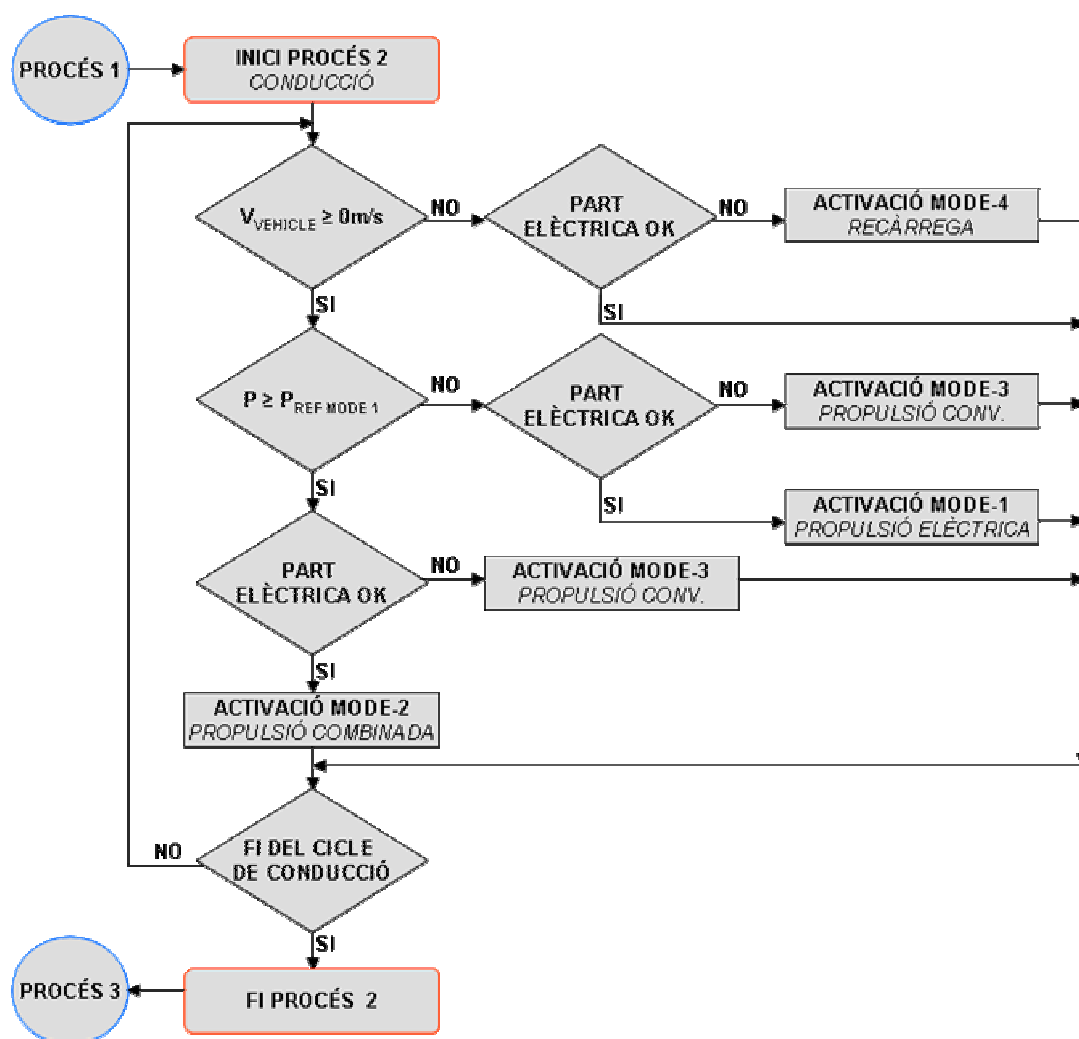


Fig. 7.3 Algorisme de control 2: Seguiment del cicle de conducció.



La gestió energètica es mostra d'una manera més visual en el gràfic següent (Fig. 7.4). En ell es mostren les corbes de parell màxim del motor elèctric i del de combustió. Es mostra també la corba del parell màxim combinat. Aquesta il·lustra el parell màxim subministrable per la transmissió del vehicle quan actuen els dos motors alhora. Finalment hi trobem la corba $P_{REF\ MODE\ 1}$.

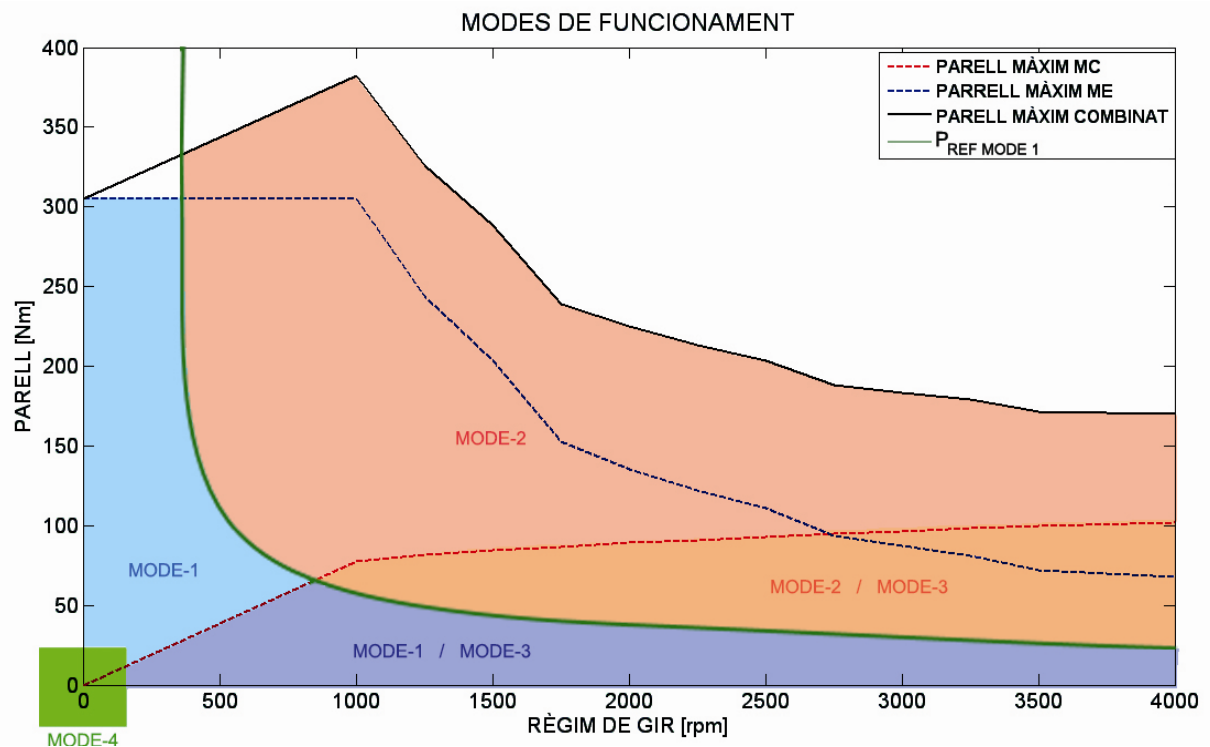


Fig. 7.4 Gestió energètica del vehicle / Modes de funcionament

Veiem com per sobre de la corba $P_{REF\ MODE\ 1}$ s'activa el mode 2 i per sota d'aquesta el mode 1. Si la part elèctrica no està en disposició de donar parell s'activa el mode 3.

Quan s'activa aquest mode el vehicle pateix una important reducció de les seves prestacions. El parell que la transmissió podrà donar estarà limitat pel parell màxim del motor de combustió.

7.1.3. Descàrrega dels supercondensadors

Un cop finalitzat el cicle de conducció, en els supercondensadors sempre hi tindrem una càrrega romanent provinent de la última o últimes frenades del vehicle per a aturar-se. Aquesta energia elèctrica es descarregarà cap a la bateria fins a deixar els supercondensadors buits o tenir la bateria completament carregada. Veiem l'algorisme de control d'aquest tercer procés en el diagrama següent (Fig. 7.5).



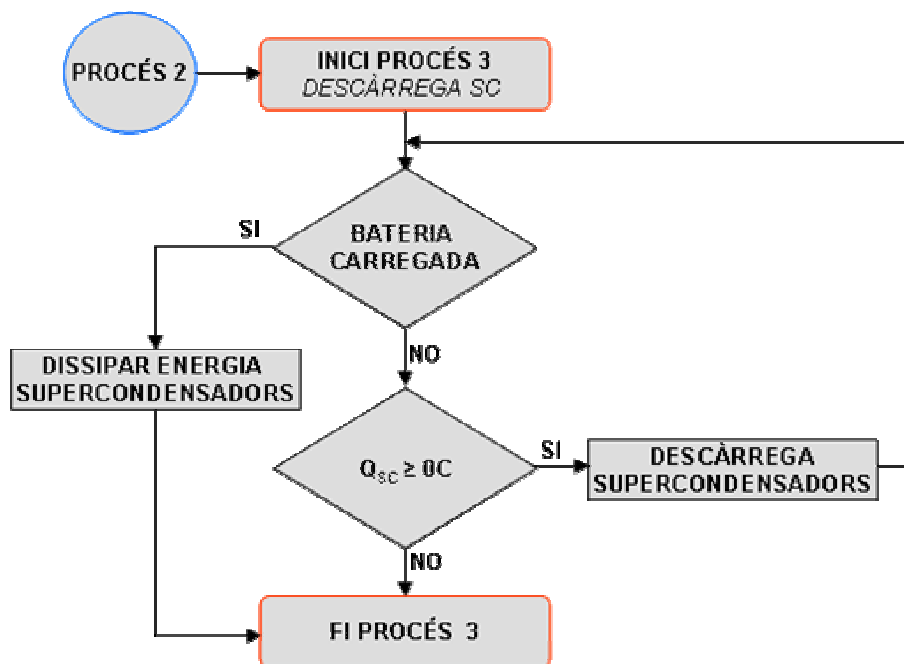


Fig. 7.5 Algorisme de control 3: Descàrrega supercondensadors i parada del vehicle.

7.2. Implementació

Dins de la part mecànica s'hi troba el bloc del repartiment. Per a les simulacions anteriors simplement ho enviava tot cap al motor de combustió o ho repartia al 50%.

En aquest cas tindrem, a grans trets, dos subsistemes (Fig. 7.6). El primer és l'encarregat de determinar el mode de funcionament adequat entre els modes 1, 2 i 4. El segon determina el repartiment més convenient.

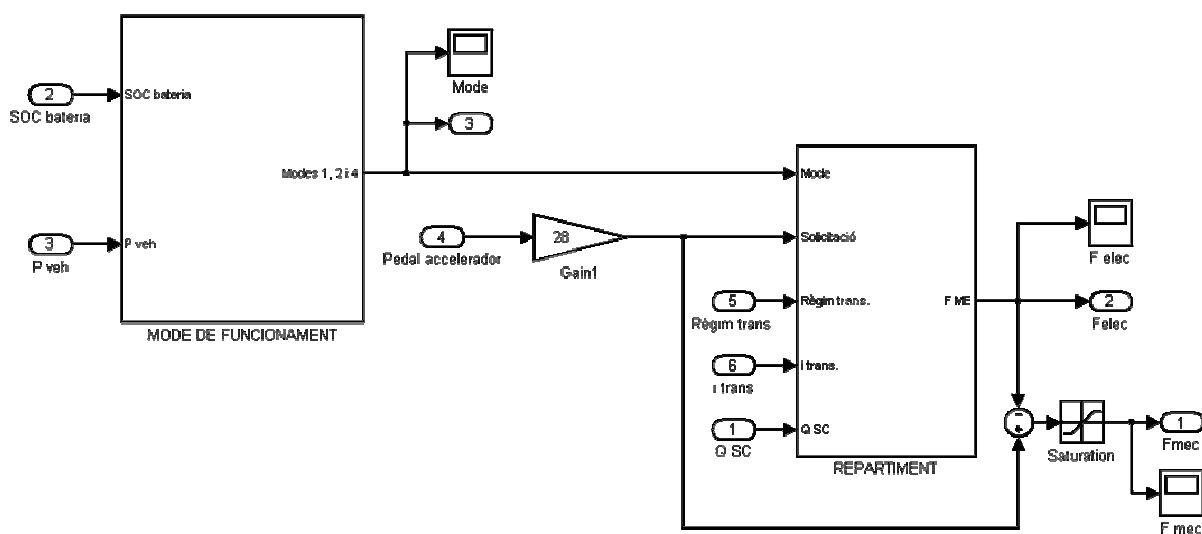


Fig. 7.6 Implementació simplificada del bloc del Repartiment.



7.2.1. Subsistema 1: Mode de funcionament

Tenim doncs com a partir del SOC de la bateria i de la velocitat del vehicle en cada instant es determina "l'estat de la part elèctrica" (Fig. 7.7). Aquest senyal serà 0 ó 1 si està en disposició de donar parell o no respectivament.

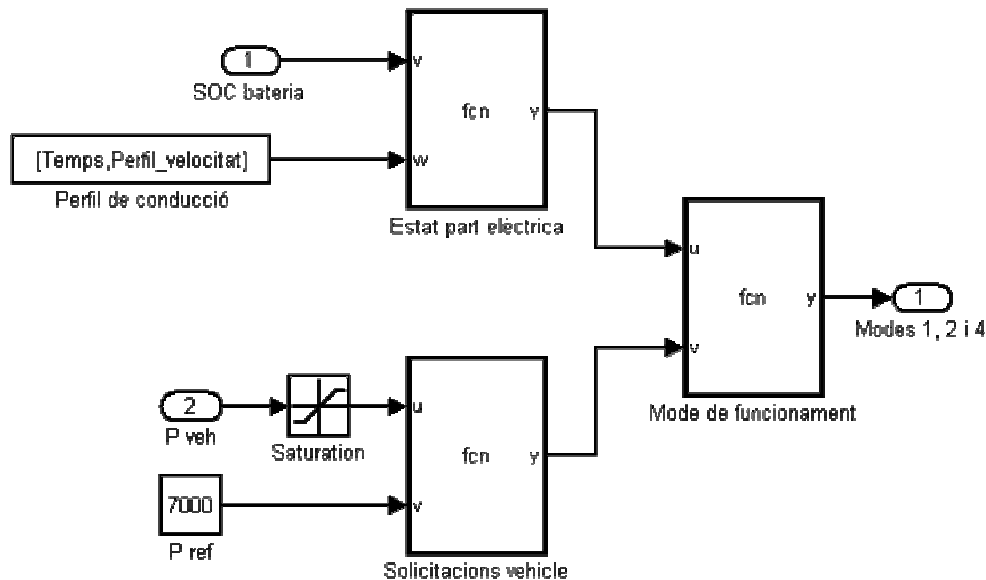


Fig. 7.7 Implementació simplificada del Subsistema 1: Mode de funcionament.

Per altra banda s'analitza la demanda de potència de tracció del sistema. Si aquesta supera el valor $P_{REFMODE1}$ es genera una senyal de valor 1. En cas contrari el senyal seria zero. A partir d'aquí en el tercer pas d'aquest subsistema es determina el mode de funcionament: 1, 2 o 4.

7.2.2. Subsistema 2: Repartiment

Pel que fa al subsistema del repartiment (Fig. 7.8) a partir del mode determinat i dels senyals del règim de la transmissió, la relació de transmissió, la sol·licitació del vehicle i de la càrrega en els supercondensadors es calculen els valors a consignar de F_{MC} i F_{ME} .

En aquest punt és on s'activa el mode de funcionament 3 en funció de la càrrega disponible als supercondensadors.

Aquest subsistema es pot subdividir en 4 passos. En el primer es determina el parell òptim que ha de donar el motor de combustió quan funciona en el mode 2. Aquest es determina a partir del règim de la transmissió. Així per a cada règim es consigna el parell que presenta la major eficiència (Fig. 7.9) a partir del mapejat introduït a la "lookup table". Aquest parell cal transformar-lo en una senyal de força que és la que cal consignar en aquest bloc.



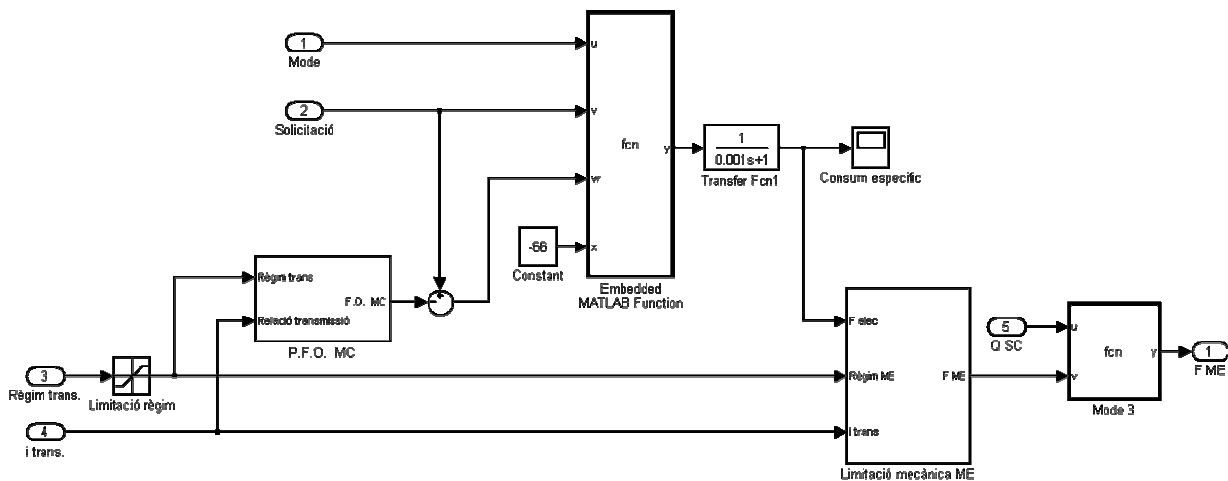


Fig. 7.8 Implementació simplificada del Subsistema 2: Repartiment.

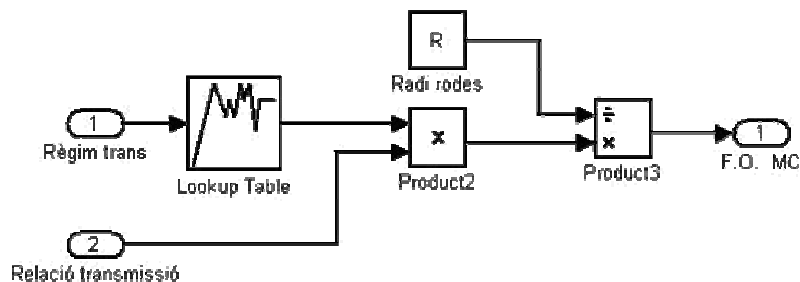


Fig. 7.9 Implementació simplificada del bloc que determina el parell òptim.

En un segon pas es decideix, a partir del senyal del mode de funcionament quin ha de ser el senyal a consignar cap al motor elèctric.

A continuació es passa aquesta consigna a través del mòdul de les limitacions mecàniques del motor elèctric. En aquest es compara el senyal generat abans amb el màxim parell que pot donar el motor elèctric. Es tria doncs el valor mínim.

Finalment, abans d'enviar el senyal cap al motor elèctric es comprova com està la part elèctrica. Concretament s'analitza, tal i com s'ha definit l'estratègia de control, quina és la càrrega present en els supercondensadors. Si aquesta és suficient la sortida serà igual que l'entrada. Sinó serà zero.

En aquest bloc de repartiment s'ha introduït un cicle d'hysteresis. L'objectiu és evitar en determinades situacions que el sistema estigui commutant contínuament entre dos modes de funcionament.



8. SIMULACIONS, RESULTATS I ESTUDI

En aquest apartat es mostren els resultats obtinguts al simular la configuració híbrida plantejada fent ús de l'estratègia de control elaborada. Finalment se'n fa una anàlisi tot comparant-los amb els obtinguts anteriorment.

8.1. Simulació de l'estratègia plantejada

8.1.1. Gràfics de funcionament

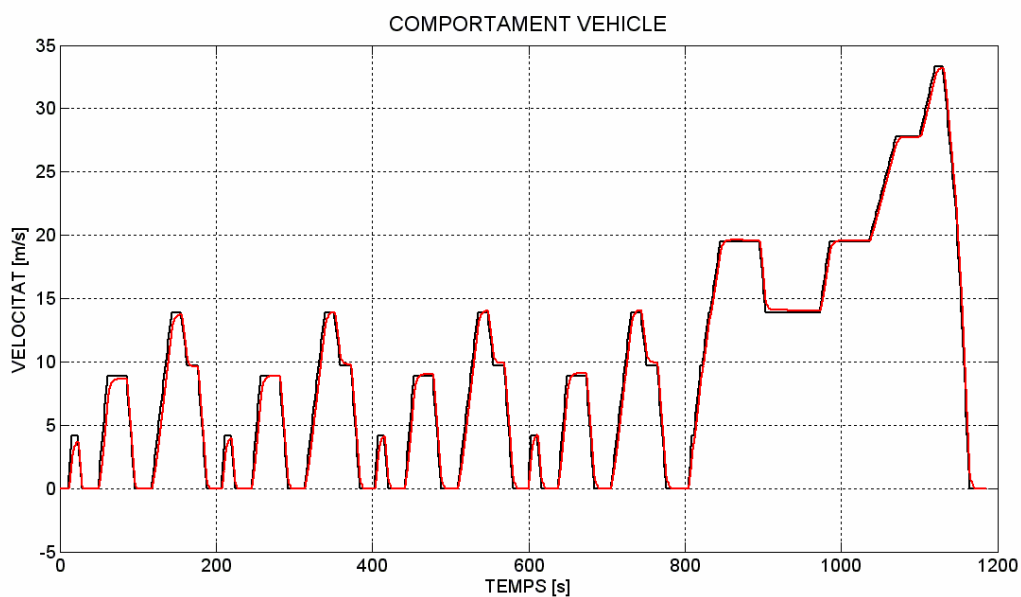


Fig. 8.1 Resposta del vehicle. Negre: perfil de velocitats consignat; Vermell: velocitat real.

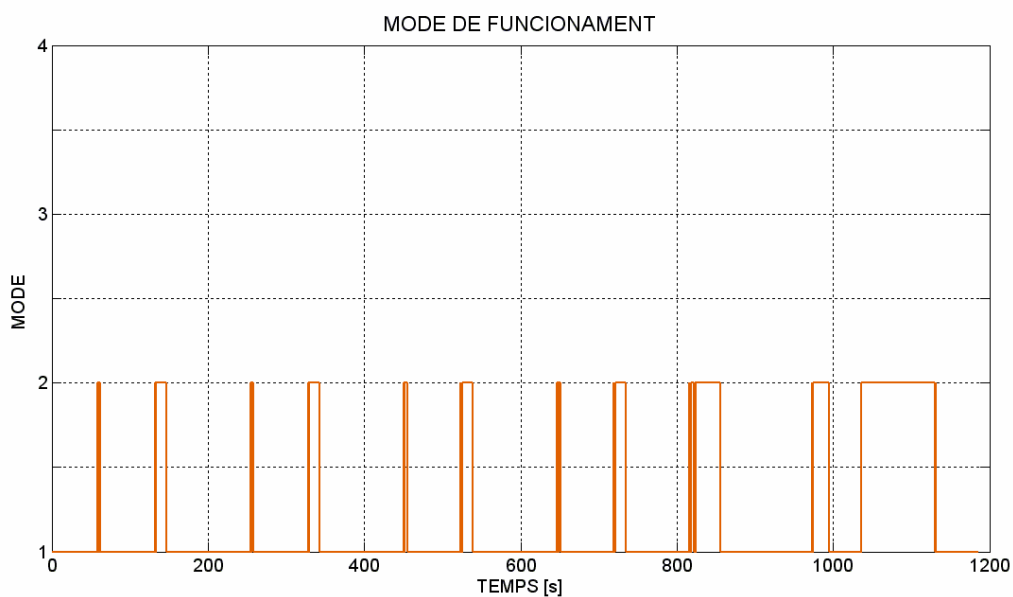


Fig. 8.2 Mode de funcionament consignat pel controlador.



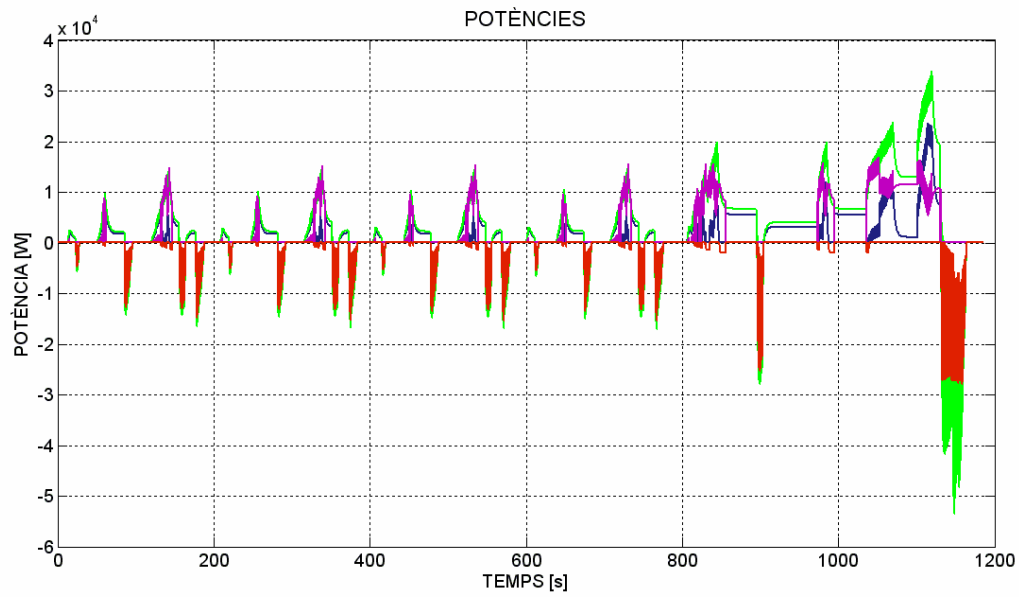


Fig. 8.3 Comparativa dels perfils de potències. ($P>0$: de tracció; $P<0$: de frenada).

■ Transmissió; ■ Motor de combustió;
■ Motor elèctric (tracció); ■ Motor elèctric (frenada)

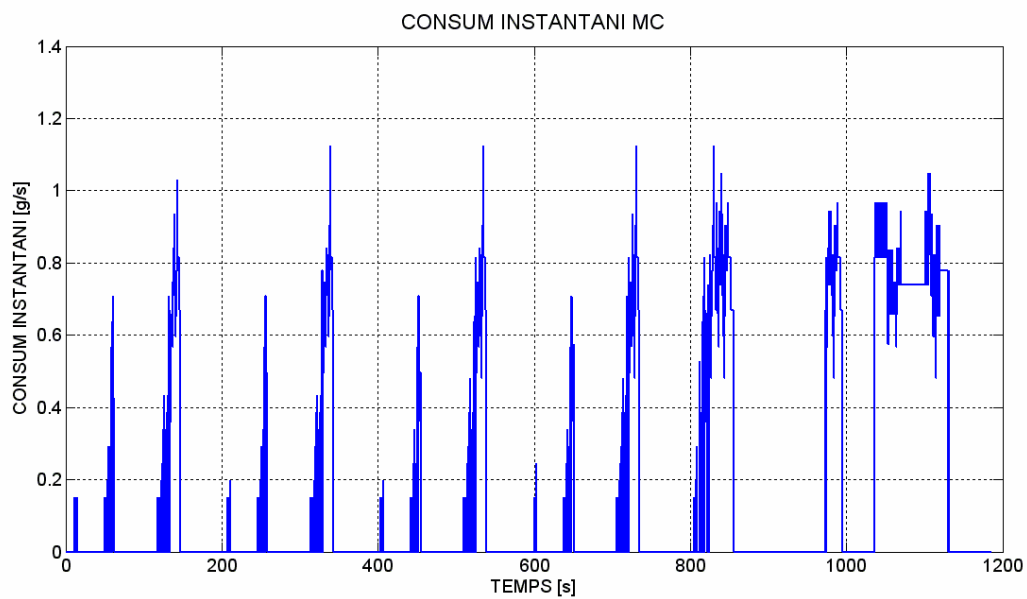


Fig. 8.4 Consum instantani en [g/s] del Motor de combustió.



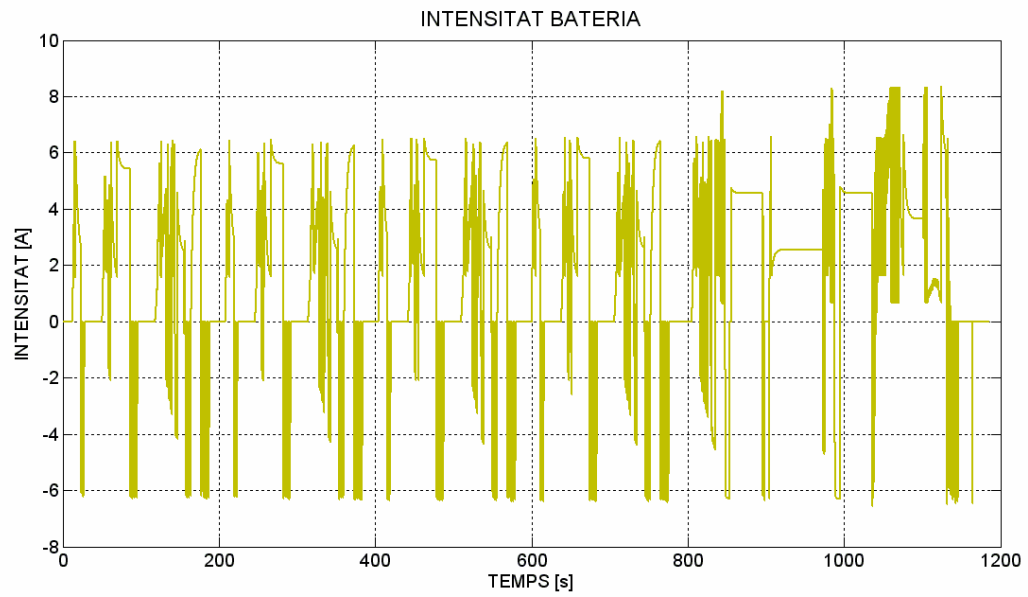


Fig. 8.5 Intensitat de treball de la bateria principal. ($I>0$: subministrada; $I<0$: absorbida).

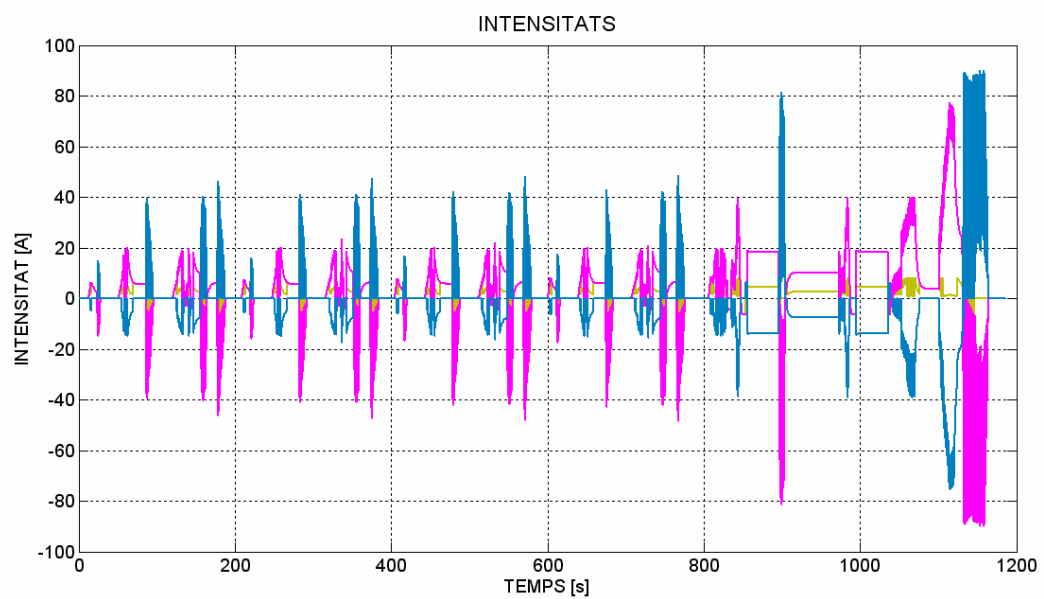


Fig. 8.6 Comparativa dels perfils de intensitats. ($I>0$: subministrada; $I<0$: absorbida).

■ Global part elèctrica; ■ Bateria;

■ Supercondensadors ($I>0$: absorbida; $I<0$: subministrada);



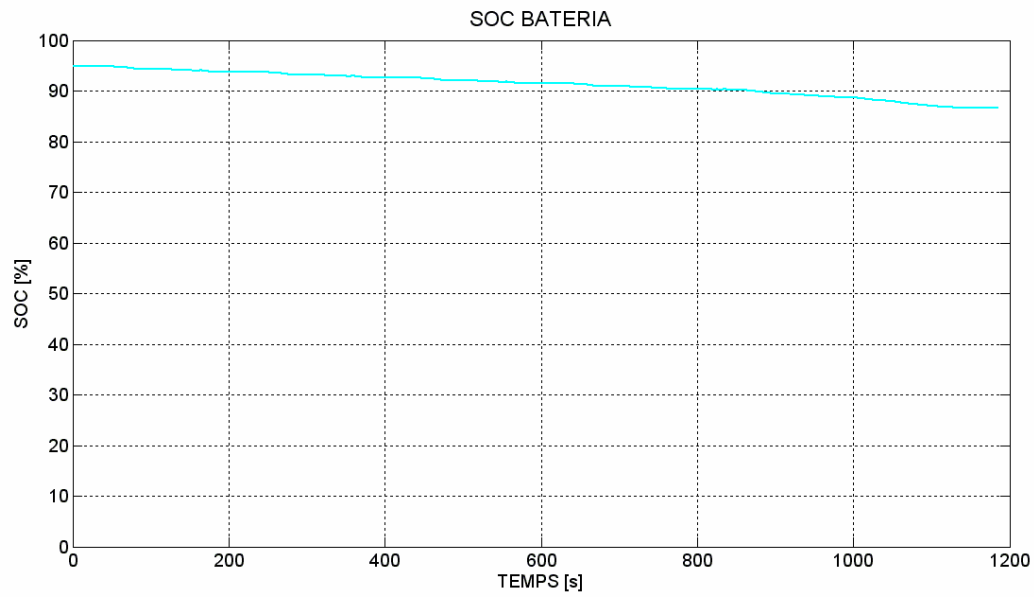


Fig. 8.7 Evolució de l'estat de càrrega (SOC) de la bateria.

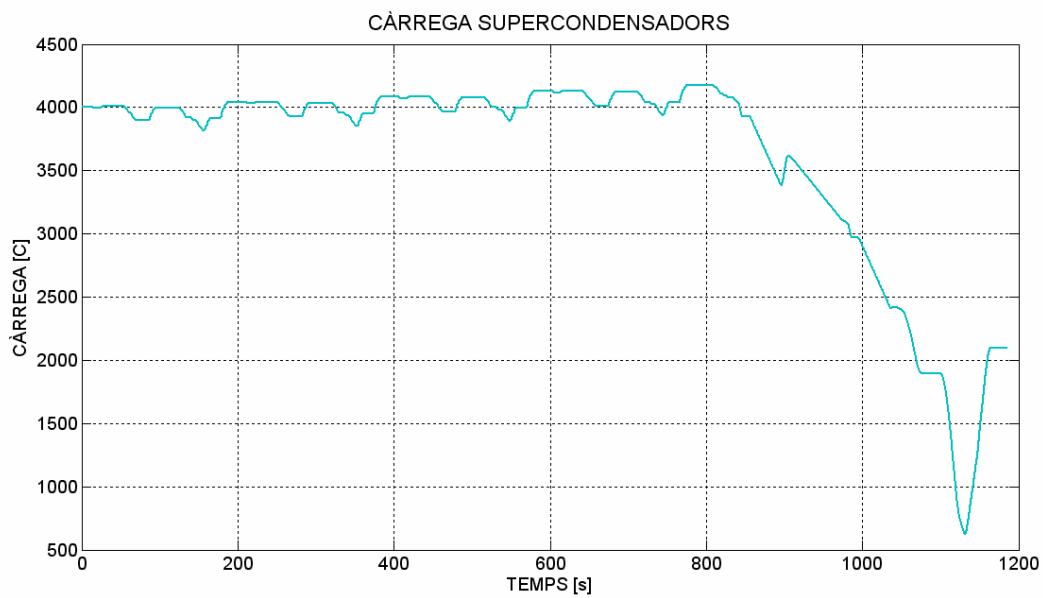


Fig. 8.8 Evolució de la càrrega dels supercondensadors.



8.1.2. Resultats

VEHICLE	
Consum energètic global [kJ]	7.661,91
MC / Part mecànica	
Rendiment mig MC [%]	32,65
Consum combustible [g]	160,64
Consum mig [l/100km]	2,19
ME / Part elèctrica	
Energia fre recuperada [%]	88,75
SOC _{FINAL BATERIA 1} [%]	86,67
Càrrega SC final [C]	2097,55
SOC _{FINAL BATERIA} [%]	88,00

Taula 8.1 Resum dels resultats numèrics de la simulació.

8.2. Anàlisi de resultats i comparativa

En aquest cas el comportament del vehicle ha estat pràcticament el mateix que en les dues simulacions anteriors.

Com era d'esperar ha seguit sense problemes el perfil de conducció (Fig. 8.1). Apart es pot comprovar com la gestió energètica aplicada ha permès que el vehicle realitzi el cicle sense arribar a activar-se els modes de funcionament 3 i 4 (Fig. 8.2). Com veiem es van alternant els modes 1 i 2 en funció de les sol·licituds de la transmissió en cada instant. S'ha conservat doncs, al llarg de tota la simulació, l'estat de la part elèctrica. Més endavant tornarem a tractar aquest tema.

A la Fig. 8.3 notem com l'aportació de cada motor és diferent als casos anteriors. El repartiment ara ja no és constant al llarg del temps.

Pel que fa a la part elèctrica el comportament general ha estat similar. Els supercondensadors s'encarreguen d'assumir (Fig. 8.6 i Fig. 8.8) els pics de potència per evitar que ho faci la bateria (Fig. 8.5). Això s'observa també en el gràfic del SOC (Fig. 8.7). Aquest pateix un descens molt més suau. Això ajuda a allargar la vida de la bateria (SOH).

Pel que fa als resultats notem la reducció del consum energètic (Taula 8.1). Això és gràcies a la millor recuperació d'energia sobretot en les frenades més fortes com ja s'ha comentat; a la major utilització d'una font d'energia més eficient (mode de funcionament 1: propulsió elèctrica); al fet de fer treballar al motor de combustió en punts de funcionament més



eficients; i a deixar-lo aturat quan el vehicle treballa en el mode 1. Veiem com el consum de combustible ha patit uns descens d'un 67% (Taula 8.2).

	SEGUIMENT PERFIL	ESTALVI ENERGÈTIC	REDUCCIÓ CONSUM
CONVENCIONAL	X	---	---
HÍBRID 50%	✓	7,53 %	15,31 %
HÍBRID 50% + SC	✓	10,90 %	15,31 %
HÍBRID EC + SC	✓	62,52 %	67,13 %

Taula 8.2 Resum comparatiu del comportament del vehicle.

La manera en què ha treballat el motor de combustió es pot observar també en part a la taula següent (Taula 8.3). Veiem com el rendiment global d'aquest ha augmentat respecte a les configuracions híbrides anteriors i a l'arquitectura convencional.

	RENDIMENT GLOBAL MC
CONVENCIONAL	22,11 %
HÍBRID 50%	14,11 %
HÍBRID 50% + SC	14,11 %
HÍBRID EC + SC	39,55 %

Taula 8.3 Resum comparatiu del rendiment global del Motor de combustió.

Els motius són que durant el mode 1 el motor de combustió queda aturat, i que durant el mode 2 treballa en els punts de màxima eficiència.

En el primer cas s'evita que quedi desembragat i girant al règim de ralenti. Un punt de funcionament que presenta inevitablement una eficiència molt baixa en comparació amb la resta del mapejat.

L'estratègia aplicada ha suposat una important reducció del consum de combustible i en conseqüència del consum energètic global. Això no s'ha aconseguit en detriment de la part elèctrica. Aquesta no ha necessitat que el vehicle activés els modes 3 ó 4 i s'ha mantingut en el rang de valors de la segona configuració híbrida analitzada (Taula 8.4).

	SOC _{INICIAL BATERIA}	SOC _{FINAL BATERIA 1}	SOC _{FINAL BATERIA}	I _{MAX BATERIA}
CONVENCIONAL	---	---	---	---
HÍBRID 50%	100,00 %	---	80,00 %	66,20 A
HÍBRID 50% + SC	94,93 %	85,97 %	89,00 %	8,40 A
HÍBRID EC + SC	94,93 %	86,67 %	88,00 %	8,40 A

Taula 8.4 Resum comparatiu de l'estat final de la Part elèctrica.



Tenim doncs uns resultats satisfactoris. De totes maneres el fet de que el vehicle no hagi necessitat recarregar la bateria presenta dubtes pel que fa al seu funcionament i al seu consum quan això si sigui necessari.

Per això s'ha plantejat una segona simulació en la que s'ha obligat al vehicle a realitzar el perfil NEDC dues vegades seguides sense aturar-se. En aquest cas no és necessari recarregar la bateria fins als últims instants del cicle. En els gràfics següents es mostra com han treballat la bateria (Fig. 8.9) i els supercondensadors (Fig. 8.10). Notem com només a l'instant **t=2200s** el SOC de la bateria baixa per sota del valor establert del 80%.

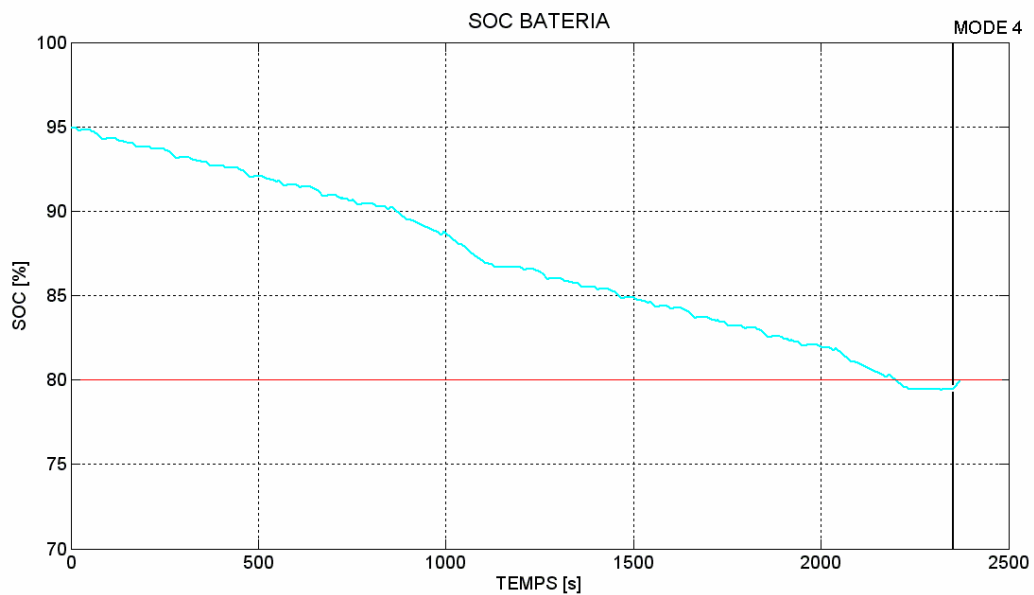


Fig. 8.9 Evolució de l'estat de càrrega de la bateria.

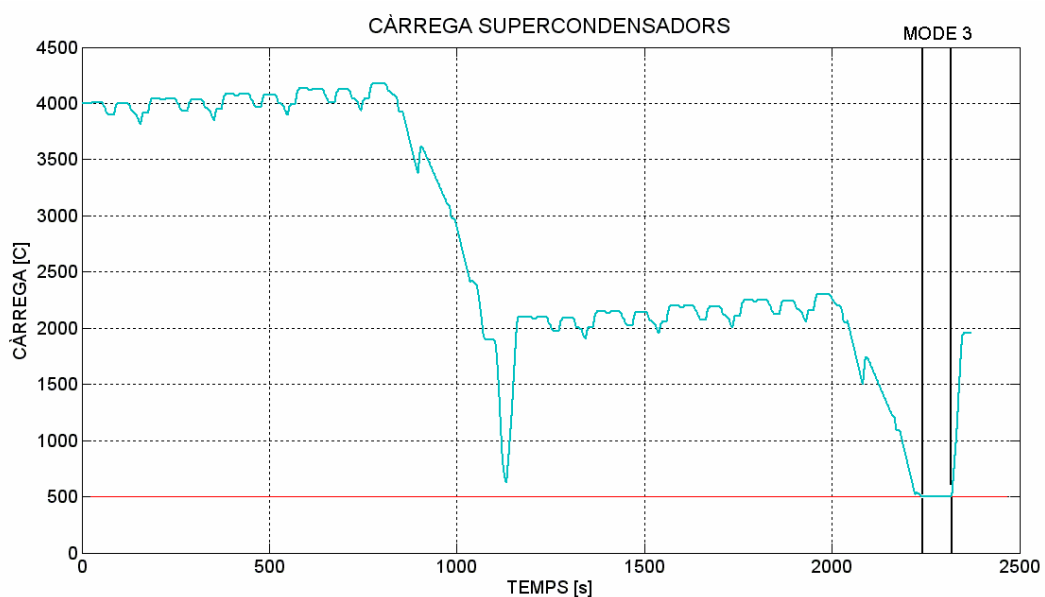


Fig. 8.10 Evolució de la càrrega dels supercondensadors.



Això provoca que després de la última frenada, quan el vehicle resta aturat a l'instant **t=2350s**, s'activi el mode 4 i es comenci a recarregar la bateria. Es pot observar en el tram final de la Fig. 8.9. Abans però els supercondensadors han arribat, a l'instant **t=2238s**, a la càrrega mínima de 500C activant-se així el mode 3 (Fig. 8.10). Notem com a partir d'aquest moment la càrrega resta constant fins a la següent frenada regenerativa que succeeix en l'instant **t=2320s**.

A les taules següents es mostren els resultats numèrics (Taula 8.5) i la comparativa amb els d'una simulació d'igual durada per a una configuració convencional (Taula 8.6).

VEHICLE	
Consum energètic global [kJ]	16.558,56
MC / Part mecànica	
Rendiment mig MC [%]	31,42
Consum combustible [g]	360,28
Consum mig [l/100km]	2,45
ME / Part elèctrica	
Energia fre recuperada [%]	90,15
SOC _{FINAL BATERIA 1} [%]	79,96
Càrrega SC final [C]	1956,38
SOC _{FINAL BATERIA} [%]	81,17

Taula 8.5 Resum dels resultats numèrics de la simulació.

	S. PERFIL	ESTALVI ENERGÈTIC	REDUCCIÓ CONSUM
CONVENCIONAL (2x)	✗	---	---
HÍBRID 50%	✓	7,53 %	15,31 %
HÍBRID 50% + SC	✓	10,90 %	15,31 %
HÍBRID EC + SC	✓	62,52 %	67,13 %
HÍBRID EC + SC (2x)	✓	59,50 %	63,13 %

Taula 8.6 Resum comparatiu del comportament del vehicle.

Veiem com el fet de consignar la recàrrega de la bateria afecta a la millora en els consums del vehicle (Taula 8.6). Tot i així l'estalvi que suposa una arquitectura híbrida amb l'estratègia de control creada és evident.



9. VALIDACIÓ I VIABILITAT ECONÒMICA

Si anem una mica més enllà, després d'aplicar el cicle de conducció doblat la bateria ha acabat amb un SOC del 81%. Això inclou la petita recàrrega feta durant l'activació del mode 4 més la descàrrega dels supercondensadors.

Això significa que la pròxima vegada que s'utilitzi el vehicle, tal i com s'ha definit l'estratègia de control, aquest recarregarà la bateria abans de fer la pre-càrrega dels supercondensadors.

Aquesta càrrega de la bateria, s'ha estimat que tindria una durada d'aproximadament 13 minuts amb un consum de combustible total d'uns 365g. Si afegim aquest consum al que es genera en el cicle de conducció NEDC obtenim un valor de 525g.

Això és més del que consumeix el vehicle convencional analitzat en un sol cicle. Però, si fem la comparació per a tres cicles, els dos ja analitzats més aquest tercer amb recàrrega inicial de bateria continuem tenint un estalvi en el consum de combustible del 40%. Situació que no aconseguiríem mai amb cap de les configuracions híbrides de referència.

Aquests valors són relatius ja que en condicions reals no tindríem tres cicles de conducció idèntics consecutivament. De totes maneres si donen una idea de l'avantatge que suposa la disposició híbrida plantejada.

Així doncs, a nivell funcional, podem donar per vàlida tant l'estratègia de control com la implantació d'una arquitectura híbrida equipada amb una bateria de supercondensadors.

Resta ara per fer una valoració econòmica que ajudi a validar-ho o descartar-ho per a una implantació generalitzada.

Per a fer-ho considerarem els següents aspectes. Partim de la base que la arquitectura híbrida té un sobrecost respecte al vehicle convencional. Això es deu al sobredimensionat de la bateria; a la implantació de la bateria de condensadors; als diferents subsistemes de control de la part elèctrica; al motor elèctric; i a l'element acoblador de parell necessari per a la propulsió híbrida.

Així l'estalvi que pot suposar el tenir un vehicle híbrid rau en el menor consum que aquest presenta funcionant.

Per tant es pot determinar una distància recorreguda mínima a partir de la qual ja surt a compte aquesta opció.



Es pot plantejar doncs la següent igualtat (Eq. 9.1):

$$\frac{C_{MH}}{100} \cdot E_G \cdot D_{MIN} + E_H = \frac{C_{MC}}{100} \cdot E_G \cdot D_{MIN} \quad (\text{Eq. 9.1})$$

On C_{MH} és el consum mig en [l/100km] del vehicle híbrid; C_{MC} és el consum mig del vehicle convencional; E_G és el preu del combustible en [€/l]; E_H és el sobrecost de la versió híbrida; i finalment D_{MIN} [km] és la distància mínima per a fer rentable la proposta.

Si considerem els valors següents (Taula 9.1):

CONCEPTE	VALOR
C_{MH} 1 CICLE [l/100km]	2,19
C_{MH} 3 CICLES [l/100km]	4,02
C_{MC} [l/100km]	6,67
E_G [€/l]	1,3
E_H [€]	11.600

Taula 9.1 Relació de valors per al càlcul de la validació econòmica.

On el sobrecost de la part híbrida es deu als diferents elements que incorpora (Taula 9.2):

CONCEPTE	SOBRECOST [€]
Bateria	500
Supercondensadors	4.000
Elements de control	600
Motor elèctric	3.000
Acoblador de parell	3.500

Taula 9.2 Relació del cost de la Part elèctrica.

Aplicant aquests valors en (Eq. 9.1) i aïllant la incògnita D_{MIN} (Eq. 9.2):

$$D_{MIN} = \frac{E_H}{\left(\frac{C_{MC} - C_{MH}}{100} \right) \cdot E_G} \quad (\text{Eq. 9.2})$$

Tenim:

-Per a un cicle: $D_{MIN} = 199.175$ km

-Per als tres cicles: $D_{MIN} = 336.720$ km



Veiem com en qualsevol dels dos casos els quilòmetres mínims a realitzar amb el vehicle per a amortitzar la inversió són elevats. Arribant als màxims que podria arribar a realitzar el propi cotxe en el segon cas.

Els resultats no són estranys donat l'alt preu que tenen actualment elements com els supercondensadors utilitzats. El mercat d'aquests es troba en un punt de transició a l'espera de que la demanda augmenti per tal de reduir-ne el cost. Un dels objectius del sector és precisament la indústria de l'automoció, sobretot si es generalitza la implantació de configuracions híbrides.

El mateix passaria, en menor grau, amb altres elements com les bateries d'alta tensió o els motors elèctrics d'aquestes característiques (alts parells i als règims de gir).

Cal tenir en compte que la comparació s'ha fet amb el mateix vehicle sense part elèctrica. És a dir, amb el mateix motor de combustió. Això suposa que la configuració híbrida té unes majors prestacions.

Si es comparés amb un altre vehicle de similars prestacions els sobrecost comentat es podria reduir un 10%. Escurçant-se en la mateixa proporció la distància mínima.





CONCLUSIONS

Un cop realitzat el projecte i finalitzats tots els estudis i totes les simulacions es fa evident la gran quantitat de feina que queda per fer en aquesta direcció. Possiblement la implantació generalitzada de solucions híbrides acabarà sent un fet. De moment l'objectiu ha de ser treballar per trobar les millors solucions per fer-ho.

Aquí s'ha presentat una possible estratègia de control per a gestionar energèticament el vehicle. Aquesta ha funcionat correctament i ha donat resultats més que satisfactoris. S'ha obtingut un estalvi de fins al 67% per a un cicle de conducció estàndard (Perfil NEDC) i de fins al 40% en una utilització regular. Evidentment és millorable ja que les possibilitats existents són moltes. Únicament jugant amb el dimensionat d'alguns dels elements del sistema o amb algun dels paràmetres definits es podrien ajustar encara més els consums.

Si s'ha deixat clara la gran utilitat de l'aplicació de la bateria de supercondensadors. Aquesta és capaç de donar al vehicle més prestacions i una capacitat de resposta molt important. Ajudant a augmentar l'estalvi energètic i millorar les condicions de funcionament d'altres elements com la bateria.

Un altre dels punts importants del projecte i que més hores de dedicació ha suposat ha estat el modelat i la implementació del vehicle. Aquest és un model de simulació creat amb el mòdul SIMULINK de MATLAB. Sobre aquest model es pot plantejar un gran nombre d'alternatives i pot ser utilitzat per a continuar amb la recerca. Tal i com s'ha plantejat, les parts mecànica i elèctrica queden disposades de forma independent. Podent variar-ne les característiques. També és susceptible de modificació el bloc del repartiment, on queda englobada l'estratègia de control i que pot ser adaptat segons convingui.

Tornant als resultats obtinguts tenim com amortitzar el sobrecost d'aquestes arquitectures pot suposar utilitzar el vehicle durant més temps del que aquest podria suportar mecànicament. Un exemple seria el Toyota Prius. Els propis comercials de Toyota asseguren que, tenint en compte les despeses que va suposar el seu desenvolupament i les provinents dels components utilitzats, Toyota perd diners amb cada Prius que ven [Ref. 15]. Gràcies però a la resta de productes i activitats de la companyia això queda emmascarat dins dels resultats econòmics globals. I és una interessant estratègia de marca el tenir en el mercat un cotxe d'aquestes característiques.

En definitiva, com ja s'ha dit, els resultats són satisfactoris però queda molt per fer. De moment la viabilitat econòmica no és del tot factible. El creixement del cost dels combustibles però ajudarà a augmentar les iniciatives i les inversions en aquest camp.





AGRAÏMENTS

Vull agrair la seva col·laboració a totes aquelles persones que d'una manera o d'una altra m'han ajudat a realitzar aquest Projecte Final de Carrera. Ja hagi estat de forma directa o indirecta, o fins hi tot sense saber-ho. Moltes gràcies a tots.


Toni Font Muñoz





BIBLIOGRAFIA

Referències bibliogràfiques

- [1] CENTRO DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA EN ELECTROQUÍMICA CIDETEC. DEPARTAMENT D'ENERGIA. Butlletí informatiu n.º.4. Sant Sebastià, 2002, p. 8-10.
- [2] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. DEPARTMENT OF ENERGY. *ADVISOR Documentation*. Golden, 2002. [Tutorial html].
- [3] WIKIPEDIA. [http://es.wikipedia.org/wiki/Toyota_Prius, 12 de desembre de 2007].
- [4] KM77.COM. [<http://www.km77.com/tecnic/a/alternativas/insight/texto.asp>, 12 de desembre de 2007].
- [5] KM77.COM. [<http://www.km77.com/marcas/opel/prototipos/ahs2/texto.asp>, 12 de desembre de 2007].
- [6] BOIX, O., CÓRCOLES, F., SAINZ, L., SUELVES, F. *Tecnología eléctrica*. Barcelona, Ediciones CEYSA, 2002, p. 247-254.
- [7] REVISTA CONSUMER. [http://revista.consumer.es/web/es/20051201/economia_domestica/70068.php, 20 de desembre de 2007].
- [8] ÁLVAREZ, J., CALLEJÓN, I. *Motores alternativos de combustión interna*. Barcelona, Edicions UPC, 2005, p. 52-55.
- [9] VOLKS&VAGEN CLUB. [<http://www.gti16.com/usr/coco/streetdyno.html>, 8 d'agost de 2008].
- [10] BOIX, O., CÓRCOLES, F., SAINZ, L., SUELVES, F. *Tecnología eléctrica*. Barcelona, Ediciones CEYSA, 2002, p. 123-179.
- [11] MPOWER SOLUTIONS. [<http://www.mpoeruk.com/soc.htm>, 22 de desembre de 2007].
- [12] KESSELS, J., *Energy Management for Automotive Power Nets*. Eindhoven, 2007, p. 15-30.
- [13] WIKIPEDIA. [http://en.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle, 12 d'agost de 2008].



[14] EUROPHYSICS NEWS.

[<http://www.europhysicsnews.com/full/23/article2/article2.html>, 12 de febrer de 2008].

[15] MOTORADICTOS. [<http://motoradictos.com/tag/toyota-prius>, 20 d'agost de 2008].

Bibliografia complementària

- BARRADE, P. DESTRAZ, B., RUFER, A. *Supercapacitive Energy Storage for Diesel-Electric Locomotives*. Speedam. 2004.

- BARRADE, P., HOTELLIER, D., RUFER, A. *Supercondensateurs et stockage d'énergie*. *Electronique de puissance Bulletin*. Vol.7(3), 2003.

- MILLER, J., SMITH, R. *Ultra-Capacitor Assisted Electric Drives for Transportation*. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Vol.2(3), 2003.

- PISU, P., RIZZONI, G. *A Comparative Study Of Supervisory Control Strategies for Hybrid Electric Vehicles*. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Vol. 15(3), 2007.







A. CARACTERÍSTIQUES DE VEHICLE

En aquest primer apartat es detallen les característiques constructives del Toyota Prius. Aquest ha servit de referència a l'hora de plantejar i dimensionar el vehicle modelitzat per a les simulacions [Ref. 3].

A.1. Toyota Prius 1.5 VVT-i HSD Automàtic Híbrid 78CV

Característiques Tècniques Generals	
Combustible	Gasolina
Cilindrada [cm ³]	1497
Potència [CV / min ⁻¹]	112 / 5000
Tracció	Davantera
Longitud [mm]	4450
Amplada [mm]	1725
Alçada [mm]	1490
Volum portaequipatges [l]	408
Pes [kg]	1375
Consum mig [l/100 km]	4.3
Velocitat Màxima [km/h]	170
Acceleració [0-100 km/h]	10.9

Taula. A.1 Característiques tècniques generals Toyota Prius. (Font: [Ref. 3]).

Motor de combustió (gasolina)	
Num. De cilindres	4 en línia
Posició del motor	Davantera - transversal
Cilindrada [cm ³]	1497
Diàmetre de carrera	75.0 x 84.7
Relació de compressió	13.0 : 1
Vàlvules per cilindre	4
Distribució	Doble arbre de lleves.
Alimentació	Injecció indirecta.
Potència màxima [CV / min ⁻¹]	77 / 5000
Parell màxim [Nm / min ⁻¹]	115 / 4200
Tracció	Davantera
Num. de velocitats	5. Caixa de canvis automàtica

Taula. A.2 Característiques del motor de combustió. (Font: [Ref. 3]).



Motor elèctric	
Tipus de propulsió	Híbrida
Tipus de motor elèctric	Imant permanent, motor síncron.
Bateria	Níquel-metall híbrida
Capacitat de la bateria [Ah]	6.5
Tensió nominal	500
Potència màxima [CV / min ⁻¹]	68/120
Potència màxima combinada [CV]	112
Parell màxim [Nm / min ⁻¹]	400/1200

Taula. A.3 Característiques del motor elèctric. (Font: [Ref. 3]).

Carrosseria	
Suspensió davantera	Independent. Tipus McPherson.
Suspensió posterior	Semi-independent
Tipus de direcció	Cremallera.
Frens davanters	Discs ventilats (255 mm)
Frens posteriors	Discs (269mm)
Neumàtics	195 / 55 R16
Llantes (Amplada x diàmetre [polzades])	Aliatge de 6.0 x 16
Distància entre eixos [mm]	2700
Via davantera [mm]	1510
Via posterior [mm]	1480
Llargada [mm]	4450
Amplada [mm]	1725
Alçada [mm]	1490
Pes [kg]	1375
Capacitat portaequipatges [l]	408
Capacitat dipòsit combustible [l]	45

Taula. A.4 Característiques de la carrosseria. (Font: [Ref. 3]).

Prestacions	
Acceleració 0-100 km/h [s]	10.9
Velocitat màxima [km/h]	170
Consum urbà [l/100 km]	5.0
Consum extraurbà [l/100 km]	4.2
Consum mig [l/100 km]	4.3
Emissions de CO ₂ [g/km]	104

Taula. A.5 Prestacions generals.



B. MODELS I DIMENSIONAT

Aquí presentem les diferents dades numèriques aplicades en els models i dimensionats dels elements del sistema i que no han quedat presentades en el cos de la memòria.

B.1. Bateria

B.1.1. Model genèric de bateria

Per a la bateria s'ha utilitzat el model genèric de bateria de la biblioteca SymPower Systems del mòdul SIMULINK de MATLAB (Fig. B.1).

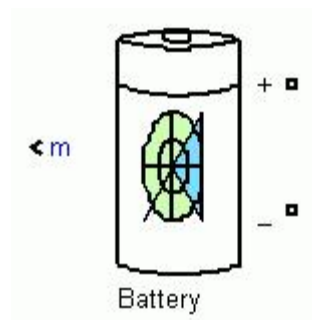


Fig. B.1 Bloc de la bateria.

B.1.2. Esquema circuit equivalent

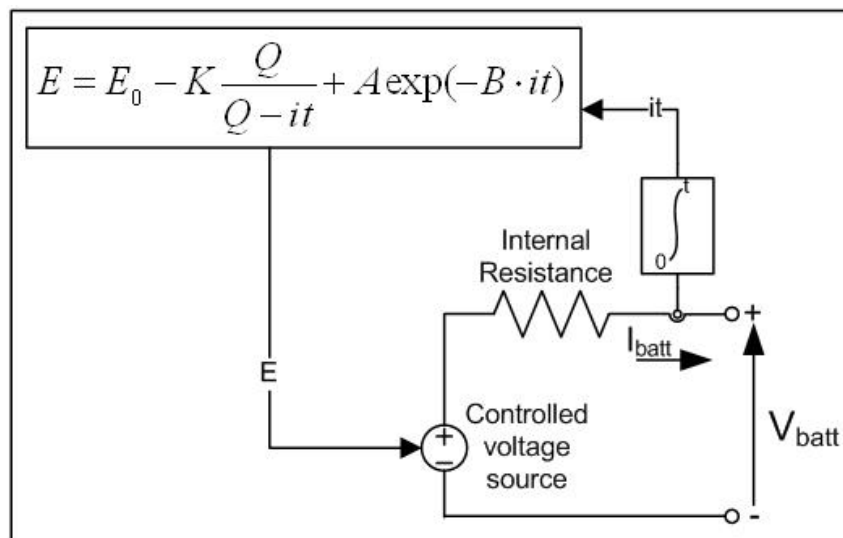


Fig. B.2 Circuit equivalent del model de la bateria.

Amb E , la tensió de curtcircuit en [V]; E_0 , valor constant de tensió nominal [V]; K , la tensió de polarització [V]; Q , la capacitat de la bateria [Ah]; A , tensió exponencial [V]; B , capacitat exponencial [Ah^{-1}];



Internament el seu dimensionat, basat en el model presentat, tindrà els següents valors:

-Valors de SOC: 0, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8 i 1

Pel que fa a la temperatura $T [^{\circ}\text{C}]$ aquesta podrà ser 0°C , 25°C o 40°C .

B.2. Motor de combustió

El rang de velocitats amb el que es treballarà és el següent [Ref. 2]:

-Règims $[\text{min}^{-1}]$: 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500, 2750, 3000, 3250, 3500 i 4000.

I pel que fa al parell motor:

-Parells motor $[\text{Nm}]$: 8.54, 16.95, 25.49, 34.04, 42.44, 50.98, 59.53, 67.94, 76.48, 85.02, 93.43 i 101.97.

B.2.1. Mapejat de consums instantanis

	104.7	130.9	157.1	183.3	209.4	235.6	261.8	288.0	314.2	340.3	366.5	418.9	ω [rad/s]
8.5	0.1513	0.1834	0.2145	0.2451	0.2759	0.3076	0.3407	0.3773	0.4200	0.4701	0.5290	0.6789	
17.0	0.1984	0.2423	0.2851	0.3274	0.3700	0.4135	0.4584	0.5068	0.5612	0.6231	0.6938	0.8672	
25.5	0.2455	0.3011	0.3557	0.4098	0.4642	0.5194	0.5761	0.6362	0.7024	0.7761	0.8585	1.0555	
34.0	0.2925	0.3599	0.4263	0.4922	0.5583	0.6253	0.6937	0.7657	0.8436	0.9290	1.0233	1.2438	
42.4	0.3396	0.4188	0.4969	0.5746	0.6525	0.7312	0.8114	0.8951	0.9849	1.0820	1.1880	1.4321	
51.0	0.3867	0.4776	0.5675	0.6570	0.7466	0.8371	0.9291	1.0246	1.1261	1.2350	1.3528	1.6204	
59.5	0.4338	0.5365	0.6381	0.7393	0.8408	0.9430	1.0468	1.1540	1.2673	1.3880	1.5175	1.8087	
67.9	0.4808	0.5953	0.7087	0.8217	0.9349	1.0490	1.1645	1.2835	1.4085	1.5410	1.6823	1.9970	
76.5	0.5279	0.6541	0.7793	0.9041	1.0291	1.1549	1.2822	1.4129	1.5497	1.6940	1.8470	2.1852	
85.0	0.5279	0.6689	0.8146	0.9659	1.1232	1.2608	1.3998	1.5424	1.6910	1.8470	2.0118	2.3735	
93.4	0.5279	0.6689	0.8146	0.9659	1.1232	1.2873	1.4587	1.6395	1.8322	1.9999	2.1766	2.5618	
102.0	0.5279	0.6689	0.8146	0.9659	1.1232	1.2873	1.4587	1.6395	1.8322	2.0382	2.2589	2.7501	
τ [Nm]													

Taula. B.1 Mapejat de consums instantanis en $[\text{g/s}]$ del motor de combustió. (Font: [Ref. 2]).

B.2.2. Mapejat de potències

	104.7	130.9	157.1	183.3	209.4	235.6	261.8	288.0	314.2	340.3	366.5	418.9	ω [rad/s]
8.5	894.6	1118.2	1341.9	1565.5	1789.2	2012.8	2236.5	2460.1	2683.8	2907.4	3131.1	3578.4	
17.0	1775.0	2218.7	2662.5	3106.2	3550.0	3993.7	4437.5	4881.2	5325.0	5768.7	6212.5	7100.0	
25.5	2669.6	3337.0	4004.4	4671.8	5339.2	6006.6	6674.0	7341.4	8008.8	8676.2	9343.6	10678.4	
34.0	3564.2	4455.2	5346.3	6237.3	7128.4	8019.4	8910.5	9801.5	10692.6	11583.6	12474.7	14256.8	
42.4	4444.6	5555.7	6666.9	7778.0	8889.2	10000.3	11111.5	12222.6	13333.8	14444.9	15556.1	17778.4	
51.0	5339.2	6674.0	8008.8	9343.6	10678.4	12013.2	13348.0	14682.8	16017.6	17352.4	18687.2	21356.8	
59.5	6233.8	7792.2	9350.7	10909.1	12467.6	14026.0	15584.5	17142.9	18701.4	20259.8	21818.3	24935.2	
67.9	7114.2	8892.7	10671.3	12449.8	14228.4	16006.9	17785.5	19564.0	21342.6	23121.1	24899.7	28456.8	
76.5	8008.8	10011.0	12013.2	14015.4	16017.6	18019.8	20022.0	22024.2	24026.4	26028.6	28030.8	32035.2	
85.0	8903.4	11129.2	13355.1	15580.9	17806.8	20032.6	22258.5	24484.3	26710.2	28936.0	31161.9	35613.6	
93.4	9783.8	12229.7	14675.7	17121.6	19567.6	22013.5	24459.5	26905.4	29351.4	31797.3	34243.3	39135.2	
102.0	10678.4	13348.0	16017.6	18687.2	21356.8	24026.4	26696.0	29365.6	32035.2	34704.8	37374.4	42713.6	
τ [Nm]													

Taula. B.2 Mapejat de potències en $[\text{W}]$ del motor de combustió. (Font: [Ref. 2]).



B.2.3. Mapejat de consums específics

	104.7	130.9	157.1	183.3	209.4	235.6	261.8	288.0	314.2	340.3	366.5	418.9	ω [rad/s]
8.5	608.85	590.42	575.45	563.61	555.13	550.15	548.41	552.11	563.38	582.08	608.22	683.00	
17.0	402.39	393.14	385.49	379.44	375.21	372.73	371.89	373.77	379.40	388.85	402.04	439.71	
25.5	331.06	324.83	319.78	315.78	312.99	311.30	310.75	311.97	315.73	322.03	330.77	355.84	
34.0	295.44	290.81	287.05	284.08	281.95	280.70	280.27	281.23	284.02	288.72	295.31	314.07	
42.4	275.07	271.37	268.32	265.95	264.25	263.22	262.88	263.64	265.91	269.66	274.93	289.99	
51.0	260.74	257.62	255.09	253.14	251.70	250.85	250.58	251.22	253.09	256.22	260.61	273.14	
59.5	250.52	247.86	245.67	243.97	242.78	242.04	241.81	242.34	243.95	246.64	250.39	261.13	
67.9	243.30	240.99	239.08	237.60	236.54	235.92	235.71	236.18	237.58	239.94	243.23	252.64	
76.5	237.29	235.22	233.53	232.23	231.29	230.73	230.54	230.95	232.20	234.30	237.21	245.56	
85.0	213.45	216.37	219.58	223.17	227.08	226.57	226.40	226.78	227.91	229.79	232.41	239.93	
93.4	194.24	196.90	199.82	203.09	206.64	210.52	214.69	219.37	224.72	226.42	228.83	235.66	
102.0	177.97	180.40	183.08	186.08	189.33	192.88	196.71	200.99	205.90	211.43	217.58	231.78	
τ [Nm]													

Taula. B.3 Mapejat de consums específics en [g/kwh] del motor de combustió. (Font: [Ref. 2]).

B.3. Motor elèctric

Els rangs de valors seran:

-Règims [min^{-1}]: 0, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500 i 6000.

-Parells motor [Nm]: 0, 5, 35, 65, 95, 125, 155, 185, 215, 245, 275 i 305.

B.3.1. Mapejat de rendiments

	0.0	52.4	104.7	157.1	209.4	261.8	314.2	366.5	418.9	471.2	628.3	ω [rad/s]
-305	0.8598	0.5320	0.6840	0.6840	0.6840	0.6840	0.6840	0.6840	0.6840	0.6840	0.6840	
-275	0.8598	0.5605	0.7030	0.7030	0.7030	0.7030	0.7030	0.7030	0.7030	0.7030	0.7030	
-245	0.8598	0.5890	0.7220	0.7220	0.7220	0.7220	0.7220	0.7220	0.7220	0.7220	0.7220	
-215	0.8598	0.6175	0.7410	0.7410	0.7410	0.7410	0.7410	0.7410	0.7410	0.7410	0.7410	
-185	0.8598	0.6460	0.7695	0.8170	0.8170	0.8170	0.8170	0.8170	0.8170	0.8170	0.8170	
-155	0.8598	0.6840	0.7885	0.8360	0.8360	0.8360	0.8360	0.8360	0.8360	0.8360	0.8360	
-125	0.8598	0.7220	0.8170	0.8550	0.8740	0.8740	0.8740	0.8740	0.8740	0.8740	0.8740	
-95	0.8598	0.7600	0.8455	0.8740	0.8835	0.8930	0.9025	0.9025	0.9025	0.9025	0.9025	
-65	0.8598	0.8075	0.8645	0.8835	0.9025	0.9025	0.9120	0.9120	0.9025	0.9025	0.9025	
-35	0.8598	0.8550	0.8930	0.8930	0.9025	0.9025	0.9025	0.9025	0.9025	0.9025	0.9025	
-5	0.8598	0.8265	0.8075	0.7885	0.7790	0.7695	0.7695	0.7600	0.7600	0.7505	0.7505	
0	0.8598	0.8598	0.8598	0.8598	0.8598	0.8598	0.8598	0.8598	0.8598	0.8598	0.8598	
5	0.8598	0.8265	0.8075	0.7885	0.7790	0.7695	0.7695	0.7600	0.7600	0.7505	0.7505	
35	0.8598	0.8550	0.8930	0.8930	0.9025	0.9025	0.9025	0.9025	0.9025	0.9025	0.9025	
65	0.8598	0.8075	0.8645	0.8835	0.9025	0.9025	0.9120	0.9120	0.9025	0.9025	0.9025	
95	0.8598	0.7600	0.8455	0.8740	0.8835	0.8930	0.9025	0.9025	0.9025	0.9025	0.9025	
125	0.8598	0.7220	0.8170	0.8550	0.8740	0.8740	0.8740	0.8740	0.8740	0.8740	0.8740	
155	0.8598	0.6840	0.7885	0.8360	0.8360	0.8360	0.8360	0.8360	0.8360	0.8360	0.8360	
185	0.8598	0.6460	0.7695	0.8170	0.8170	0.8170	0.8170	0.8170	0.8170	0.8170	0.8170	
215	0.8598	0.6175	0.7410	0.7410	0.7410	0.7410	0.7410	0.7410	0.7410	0.7410	0.7410	
245	0.8598	0.5890	0.7220	0.7220	0.7220	0.7220	0.7220	0.7220	0.7220	0.7220	0.7220	
275	0.8598	0.5605	0.7030	0.7030	0.7030	0.7030	0.7030	0.7030	0.7030	0.7030	0.7030	
305	0.8598	0.5320	0.6840	0.6840	0.6840	0.6840	0.6840	0.6840	0.6840	0.6840	0.6840	
τ [Nm]												

Taula. B.4 Mapejat de rendiments del motor elèctric. (Font: [Ref. 2]).



C. IMPLEMENTACIÓ

En aquest apartat es mostren alguns blocs ó models importants de la implementació que no han quedat descrits en detall al cos de la memòria.

C.1. El conductor

C.1.1. Controlador PI del bloc del conductor

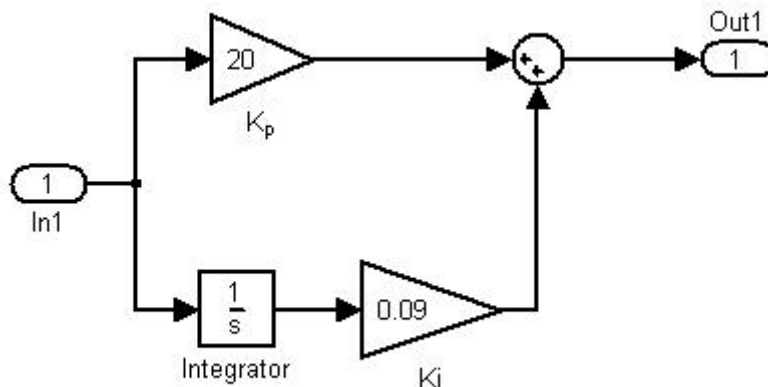


Fig. C.1 Implementació simplificada del controlador PI.

A la imatge anterior (Fig. C.1) es mostra la implementació del controlador PI present en el bloc del conductor. La relació $G(s)$ entre la entrada $E(s)$ (port *In1* de la imatge), corresponent a l'error entre la velocitat consignada i la real, i la sortida $U(s)$ (port *Out1*) és (Eq. C.1):

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (\text{Eq. C.1})$$

C.2. Gestió de la frenada

El senyal del pedal del fre, ja traduït en una consigna de força, es compara amb el parell màxim assumible pel motor elèctric a través del mapejat de parell màxim d'aquest (Fig. C.2). La consigna de força negativa (de recuperació) que va cap al motor elèctric és la més petita en valor absolut de les dues.



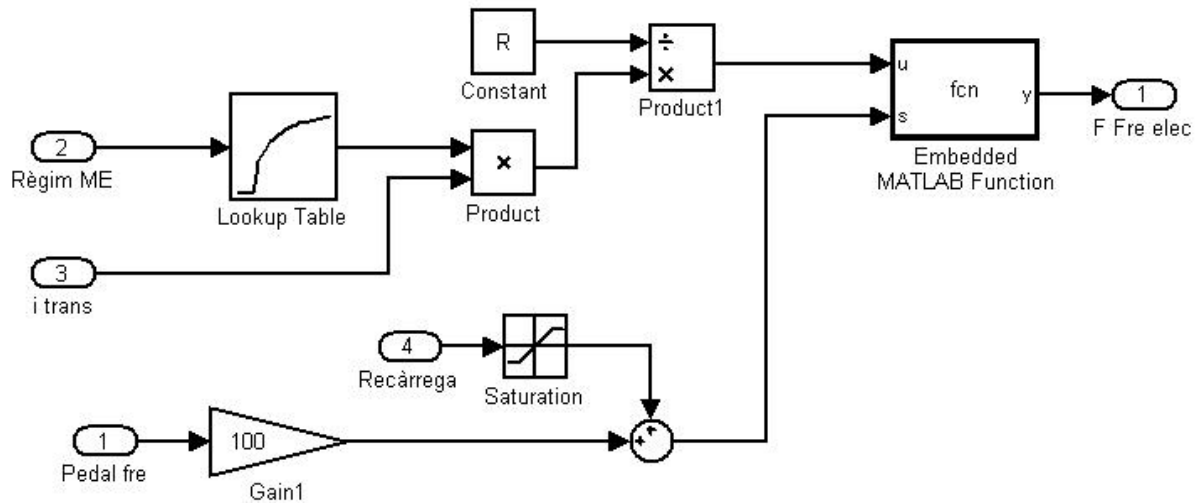


Fig. C.2 Implementació simplificada del repartiment de la frenada.

C.3. Part elèctrica

C.3.1. Control dissipació

Dins de la part elèctrica trobem el bloc dissipador que ajuda a que tot funcioni correctament. Aquest compara la tensió de la bateria en cada instant amb un valor de referència màxim. Si es supera aquest valor es consigna un corrent de dissipació que fa disminuir la tensió de bus i per tant la de la bateria.

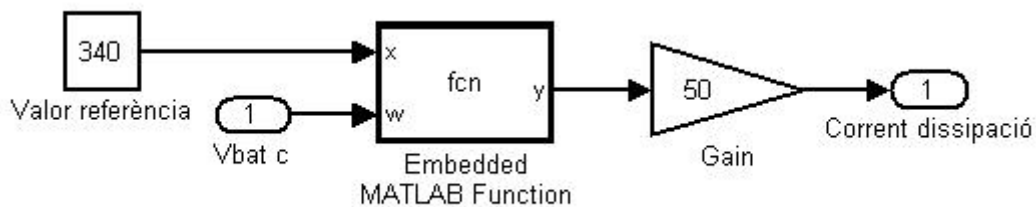


Fig. C.7 Implementació simplificada del dissipador.



D. SIMULACIONS COMPLEMENTÀRIES

En aquest apartat es mostren els resultats de dues simulacions complementàries on s'ha fet seguir al vehicle un perfil de conducció diferent al utilitzat anteriorment. En aquest cas s'ha utilitzat el perfil HWFET (Highway Fuel Economy Test). Aquest és l'equivalent als Estats Units del NEDC. S'utilitza per a la certificació de vehicles turismes [Ref. 2].

La durada d'aquest cicle es relativament inferior. Arriba fins a l'instant $t=766s$, uns 13 minuts. Per contra el NEDC en durava 1186s, uns 20 minuts.

Les velocitats consignades varien. El cicle d'homologació europeu realitza una primera part repetitiva equivalent a una circulació urbana i acaba aplicant un cicle per via ràpida. Aquest segon, com el seu nom indica, contempla únicament una circulació variable per via ràpida al llarg de tot el perfil.

En primer lloc per tal de tenir uns valors de referència s'ha simulat el vehicle amb una arquitectura convencional. A continuació s'ha fet el mateix amb la configuració híbrida dotada de la bateria de supercondensadors i amb l'estratègia de control plantejada.

D.1. Vehicle convencional

D.1.1. Gràfics de funcionament

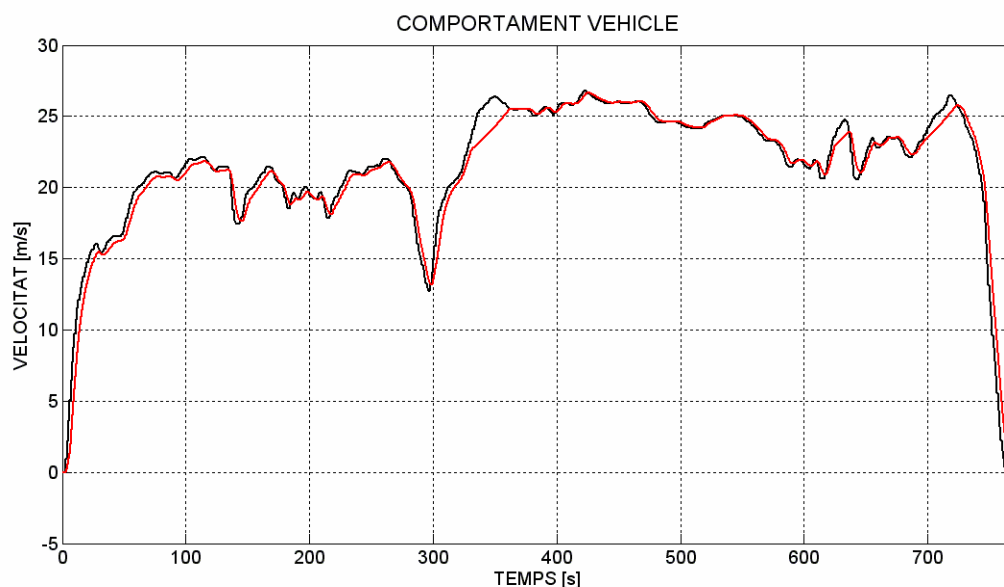


Fig. D.1 Resposta del vehicle. Negre: perfil de velocitats consignat; Vermell: velocitat real.



D.1.2. Resultats

VEHICLE	
Consum energètic global [kJ]	21.425,01
MC / Part mecànica	
Rendiment mig MC [%]	31,59
Consum combustible [g]	512,07
Consum mig [l/100km]	4,60

Taula. D.1 Resum dels resultats numèrics de la simulació.

D.1.3. Anàlisi

Per a aquesta primera simulació de referència simplement notar com en alguns moments el vehicle no ha estat capaç de seguir el perfil de conducció (Fig. D.1).

De la mateixa manera que passava per al perfil NEDC el motor de combustió no es capaç de subministrar el parell necessari a determinats règims de gir. Quan aquest assoleix el seu règim de gir màxim la caixa de canvis automàtica es veu obligada a passar de quarta a cinquena marxa. Disminuint així el parell que el motor pot donar.

Els resultats numèrics de consums i rendiment es mostren a la Taula D.1.

D.2. Configuració híbrida

D.2.1. Gràfics de funcionament

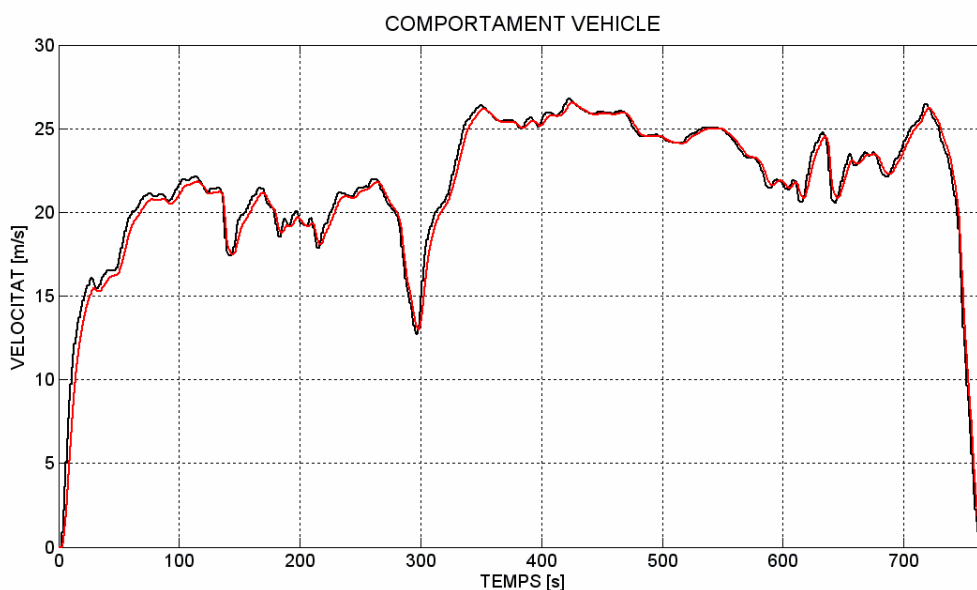


Fig. D.3 Resposta del vehicle. Negre: perfil de velocitats consignat; Vermell: velocitat real.



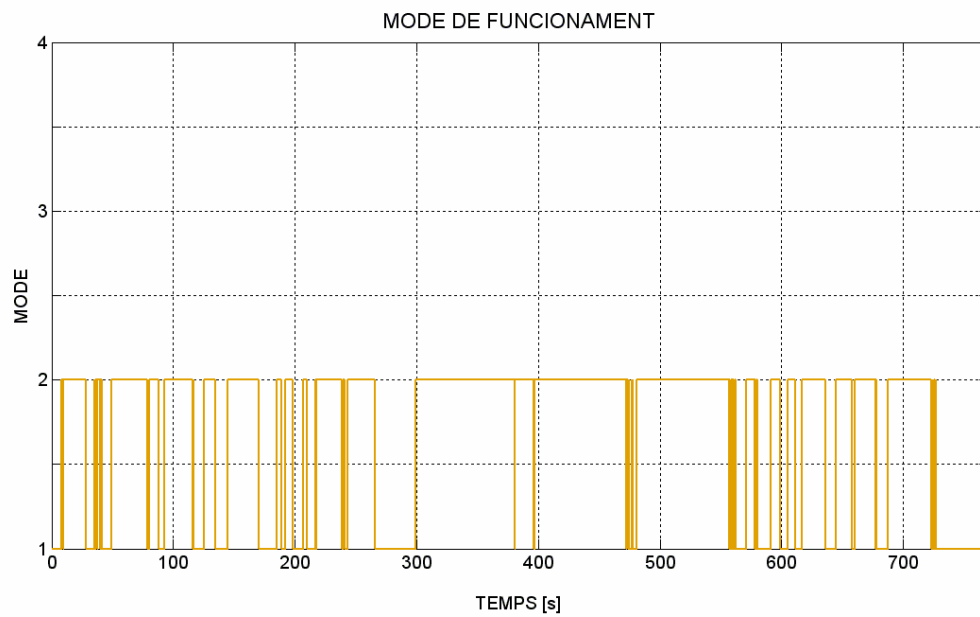


Fig. D.4 Mode de funcionament consignat pel controlador.

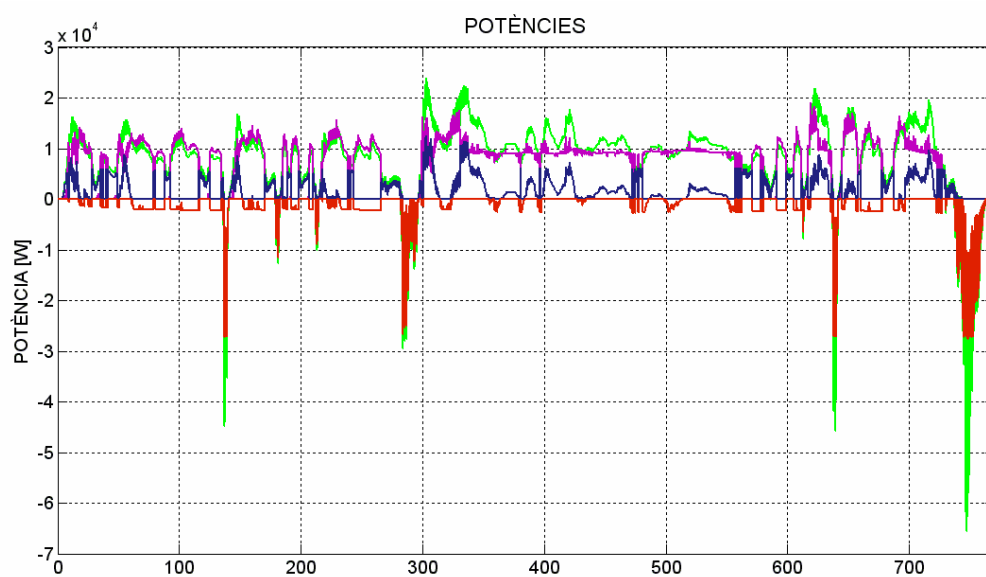


Fig. D.5 Comparativa dels perfils de potències. ($P > 0$: de tracció; $P < 0$: de frenada).

■ Transmissió; ■ Motor de combustió;
 ■ Motor elèctric (tracció); ■ Motor elèctric (frenada)



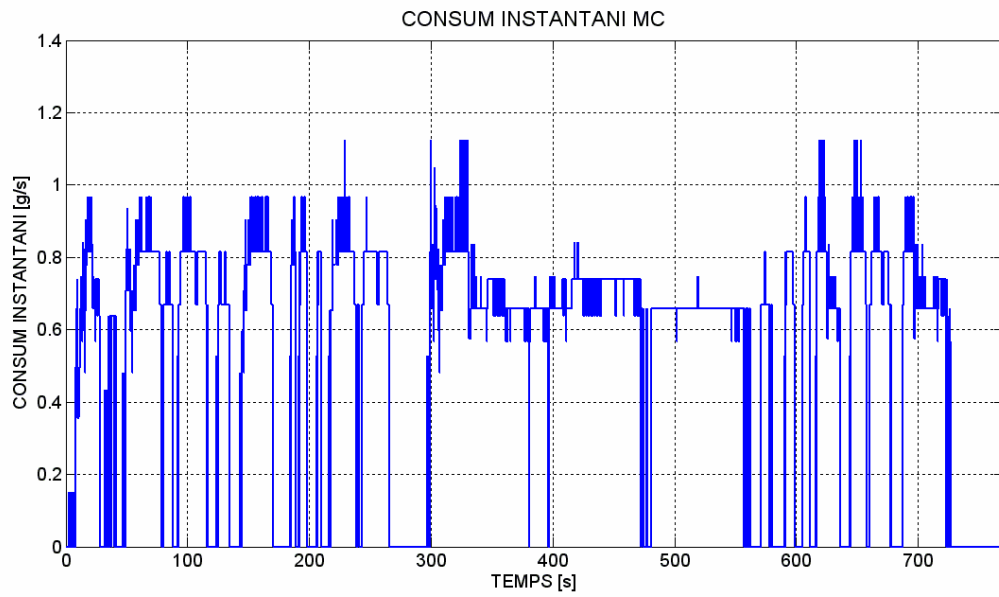


Fig. D.6 Consum instantani en [g/s] del Motor de combustió.

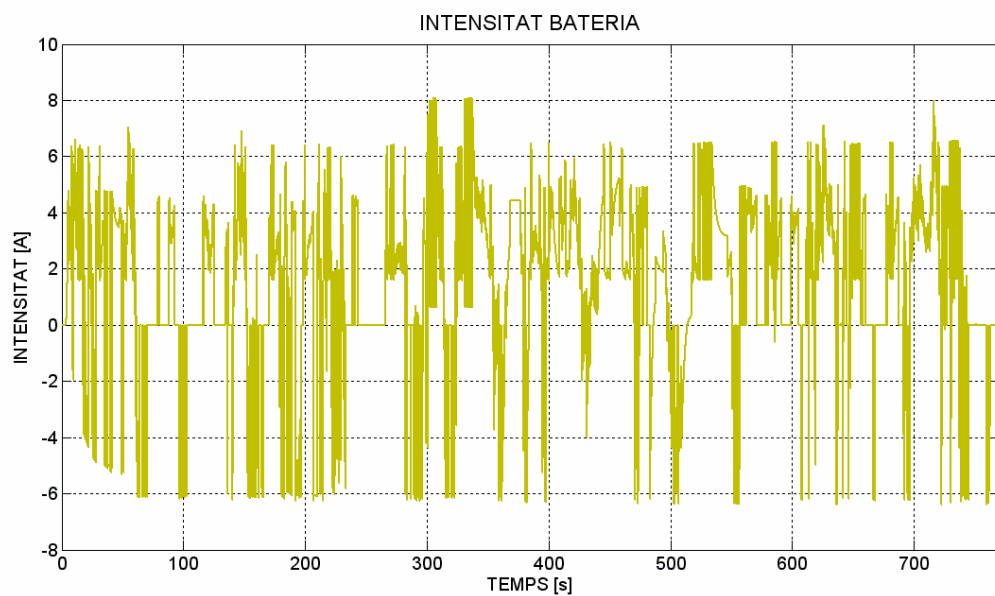


Fig. D.7 Intensitat de treball de la bateria principal. ($I > 0$: subministrada; $I < 0$: absorbida).



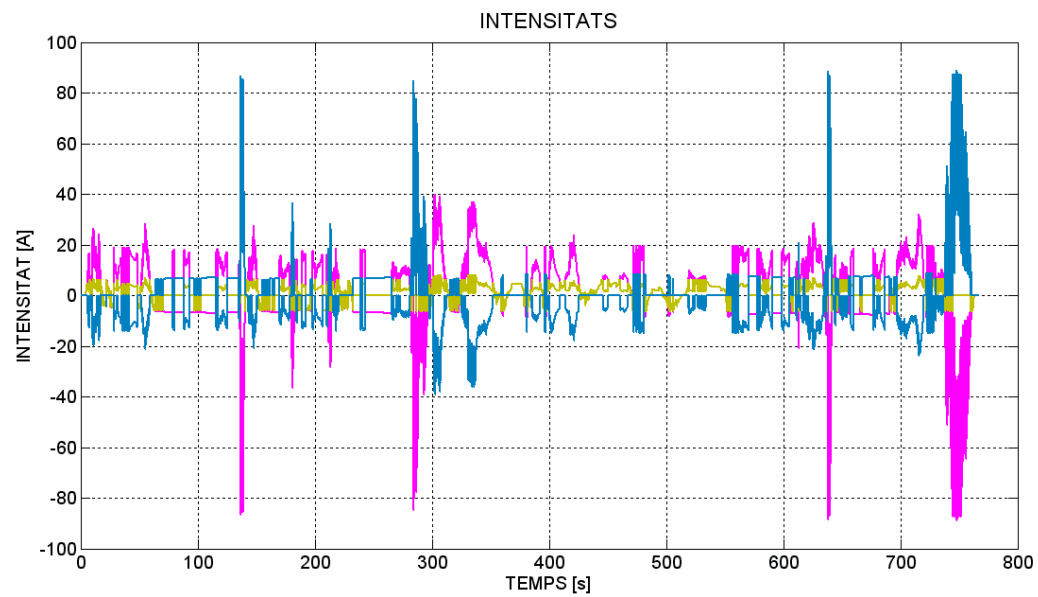


Fig. D.8 Comparativa dels perfils de intensitats. ($I > 0$: subministrada; $I < 0$: absorbida).

- Global part elèctrica; ■ Bateria;
■ Supercondensadors ($I > 0$: absorbida; $I < 0$: subministrada);

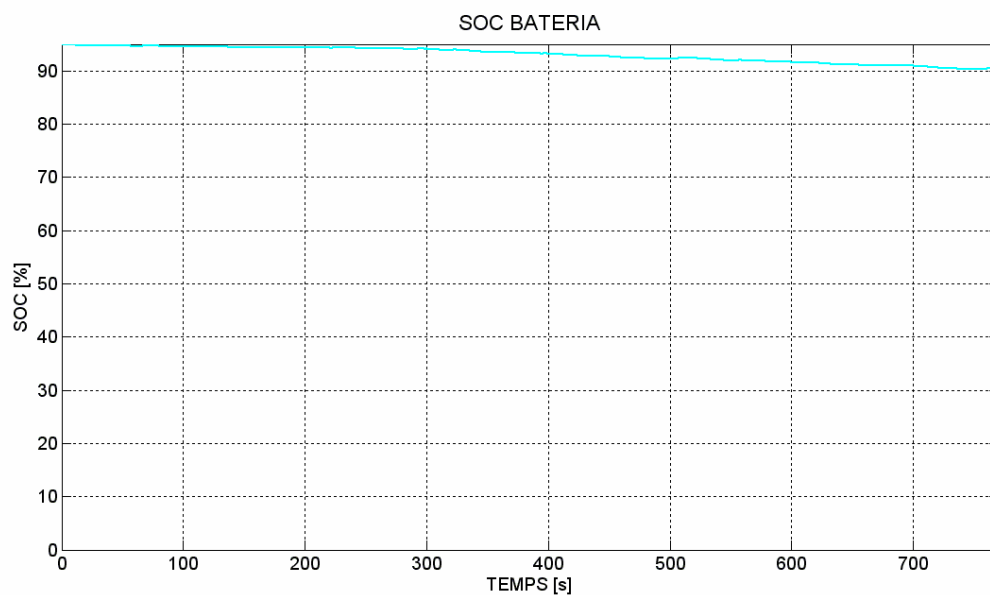


Fig. D.9 Evolució de l'estat de càrrega de la bateria.



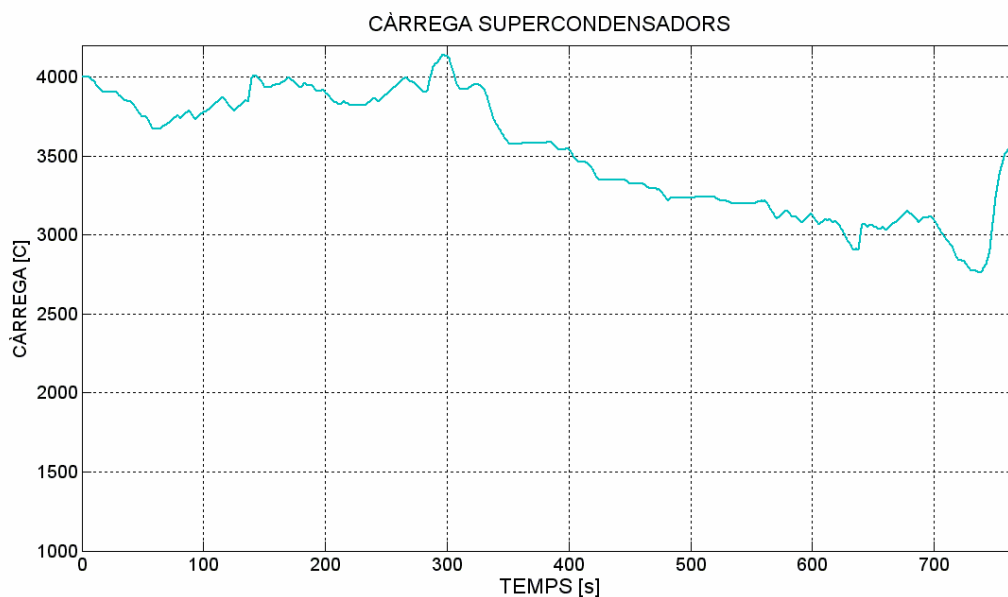


Fig. D.10 Evolució de la càrrega dels supercondensadors.

D.2.2. Resultats

VEHICLE	
Consum energètic global [kJ]	17.023,63
MC / Part mecànica	
Rendiment mig MC [%]	32,92
Consum combustible [g]	396,28
Consum mig [l/100km]	3,56
ME / Part elèctrica	
Energia fre recuperada [%]	89,50
SOC _{FINAL BATERIA 1} [%]	90,41
Càrrega SC final [C]	3537,70
SOC _{FINAL BATERIA} [%]	94,00

Taula D.2 Resum dels resultats numèrics de la simulació.

D.2.3. Anàlisi

En aquesta ocasió el vehicle si ha estat capaç de seguir el perfil de velocitats consignat (Fig. D.3). Gràcies al motor elèctric ha pogut donar el parell requerit en cada instant.

Centrant-nos en el treball de l'estratègia de control veiem com per a aquest perfil ha estat treballant entre els modes 1 i 2 (Fig. D.4). A la Fig. D.5 veiem quina ha estat l'aportació de potència de cada motor així com l'actuació del motor elèctric durant les frenades regeneratives.



De la mateixa manera que en els casos anteriors la bateria ha pogut treballar correctament (Fig. D.6) gràcies a l'actuació dels supercondensadors (Fig. D.7).

S'ha conservat l'estat de la part elèctrica (Fig. D.9 i Fig. D.10). No ha fet falta en cap moment que l'estratègia activés els modes 3 o 4.

D.3. Anàlisi de resultats i comparativa

Pel que fa als resultats tenim com a part de la millor resposta del vehicle aquest ha presentat un consum energètic inferior. El seu consum de combustible també s'ha reduït (Taula D.3).

	SEGUIMENT PERFIL	ESTALVI ENERGÈTIC	REDUCCIÓ CONSUM
CONVENCIONAL	x	---	---
HÍBRID EC + SC	✓	20,54%	22,61%

Taula D.3 Comparativa del funcionament general del vehicle.

Tal i com succeïa en anteriors simulacions el fet d'utilitzar una propulsió purament elèctrica i mantenir el motor de combustió aturat ha millorat el seu rendiment global (Taula D.4).

	RENDIMENT GLOBAL MC
CONVENCIONAL	31,59%
HÍBRID EC + SC	32,92 %

Taula D.4 Comparativa del funcionament del motor de combustió.

En definitiva, aquests resultats validen l'estratègia de control proposada. Aquesta s'ha adaptat sense cap problema a un cicle de conducció diferent i ha proporcionat al vehicle d'unes prestacions i un rendiment majors.

